Energía Eólica

Manual técnico para pequeñas instalaciones

Autores
M. Sc. Ing. Carlos Orbegozo
Ing. Roberto Arivilca

2010

Green Energy Consultoría y Servicios SRL ©

ENERGIA EÓLICA

Manual técnico para pequeñas instalaciones

Módulo Básico

PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

La publicación del presente documento ha sido posible gracias a la ayuda económica del Deutscher Entwicklingsdienst (DED). El contenido es responsabilidad exclusiva de GREEN ENERGY y no se debe considerar como opinión del DED.

GREEN ENERGY desea que la información existente en el presente documento sirva para el desarrollo profesional de los (las) lectores (lectoras).

CLÁUSULA DE EXENCIÓN DE RESPONSABILIDAD

Mediante el presente documento, GREEN ENERGY pretende difundir conceptos básicos sobre la tecnología de los pequeños aerogeneradores y su utilización con respeto al medio ambiente, dentro del contexto social y económico de los países involucrados. Trataremos de corregir los errores que se nos señalen, aplicando el concepto de la mejora continua.

No obstante, GREEN ENERGY no asume responsabilidad alguna en relación con el contenido de las siguientes páginas, puesto que:

- consiste únicamente en información básica que no aborda circunstancias específicas relativas a los componentes y sistemas analizados;
- contiene en algunas ocasiones enlaces a páginas externas sobre las que las actividades de GREEN ENERGY no tienen control alguno y respecto de las cuales declina toda responsabilidad;
- no ofrece asesoría profesional o jurídica (si desea efectuar una consulta de este tipo, diríjase siempre a un profesional debidamente calificado).

Pretendemos reducir al mínimo los problemas ocasionados por errores de carácter técnico. Sin embargo, algunos datos o informaciones contenidas en las siguientes páginas pueden haber sido creados o estructurados en archivos o formatos no exentos de errores, por lo que no podemos garantizar que nuestro servicio no quede interrumpido o afectado de cualquier otra forma por tales problemas. GREEN ENERGY no asume responsabilidad alguna respecto de dichos problemas, que puedan resultar de la consulta de las presentes páginas.

La presente cláusula de exención de responsabilidad no tiene por objeto limitar la responsabilidad de GREEN ENERGY de forma contraria a lo dispuesto por las normativas nacionales aplicables, ni excluir su responsabilidad en los casos en los que, en virtud de dichas normativas, no pueda excluirse.

TABLA DE CONTENIDOS

1. PRÓLOGO 6

2. GLOSARIO DE TÉRMINOS TÉCNICOS 8

3. CONCEPTOS BASICOS 12

3.1 ¿Qué es la energía eólica? 12
3.2 Tipos de aerogeneradores 12
3.3 Aplicaciones de los sistemas eólicos 15
3.4 Posibilidades y limitaciones 15

4. EL VIENTO: RECURSO ENERGÉTICO 17

4.1 Datos de la velocidad del viento 17
4.2 Unidades 20
4.3 Mediciones de energía eólica 20
4.4 Instrumentos de medición 21
4.5 ¿Cómo se mide la velocidad del viento? 24
4.6 Verificación de los datos registrados 30
4.7 Distribución de la velocidad del viento 31
4.8 Conclusiones 32

5. ¿COMO OPERAN LOS SISTEMAS EÓLICOS? 34

5.1 Introducción 34
5.2 Sistemas de control y seguridad 39
5.3 Generador 42
5.4 Baterías 44
5.5 Componentes electrónicos 46
5.6 Torre 49
5.7 Caja de engranajes 51

6. DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA EÓLICO 52

6.1 Demanda de energía 52
6.2 Patrones de consumo de energía 53
6.3 Suministro de energía 55
6.4 Estimar los datos de velocidad de viento 59
6.5 Almacenamiento 64
6.6 ¿Cómo se selecciona un aerogenerador? Recomendaciones 68
6.7 Seguridad 71

7. INSTALACIÓN DE UN SISTEMA EÓLICO 73

7.1 Ensamblaje de la turbina eólica 73
7.2 Instalación de la torre 73
7.3 Instalación del Sistema Central de Distribución 74
7.4 Instalación de un transformador (opcional, para generadores con alto voltaje: 240 V o más) 74
7.5 Instalación de un interruptor de frenado (opcional) 74
7.6 Instalación del disipador de carga 75
7.7 Instalación del inversor 75
7.8 Instalación de las baterías 76
7.9 Selección de los cables 77

8. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE UN SISTEMA EÓLICO 79

8.1 Pruebas eléctricas 79
8.2 Mantenimiento de un sistema eólico 80
8.3 Guía de solución de problemas y reparaciones (Troubleshooting) 81

ANEXOS..... 87

ANEXO 1: ESCALA DE BEAUFORT 88
ANEXO 2: DENSIDAD DEL AIRE 89
ANEXO 3: LEGISLACIÓN Y NORMATIVA Y RENOVABLE 91

1. PRÓLOGO

El curso **Energía eólica para pequeñas instalaciones** ha sido diseñado especialmente para el Proyecto ID/772. En él se tratarán los aspectos teóricos y prácticos básicos de esta tecnología, utilizando un lenguaje sencillo y acompañando cada tema con gráficos, tablas y fotos.

El objetivo principal del curso es poner a disposición de los interesados, un conocimiento básico acerca de los fundamentos de la tecnología eólica de pequeña potencia a través de un enfoque práctico del tema, desarrollando únicamente los puntos más relevantes del aspecto teórico. De este modo, al finalizar el curso, el alumno habrá adquirido un conocimiento básico acerca de la tecnología de los pequeños aerogeneradores, sus posibilidades, restricciones y aplicaciones. A su vez, será capaz de dimensionar, instalar, inspeccionar y dar mantenimiento a pequeños aerogeneradores. Por último, aprenderá a realizar mediciones y a detectar errores en el sistema.

¿Porqué estudiar energía eólica?

Las ventajas de la energía eólica son significativas: protección al medio ambiente, crecimiento económico, creación de puestos de trabajo, diversificación del suministro de energía, rápida instalación, innovación y transferencia de tecnología. Su combustible es gratuito, abundante e inagotable. Pero sobre todo, es una alternativa viable para pequeños consumos de energía, como en las zonas rurales y aisladas. Es una opción válida de llevar energía a aquellas personas que nunca verán la energía convencional por ser demasiado cara y difícil de dar mantenimiento.

Fuente: www.itdg.org.pe

Figura 1: Sistema eólico en zona rural

No obstante, estas ventajas están generalmente aún sin explotar. La mayoría de las decisiones en materia energética que se toman actualmente no contemplan la energía eólica, y ésta enfrenta aún muchas barreras y obstáculos.

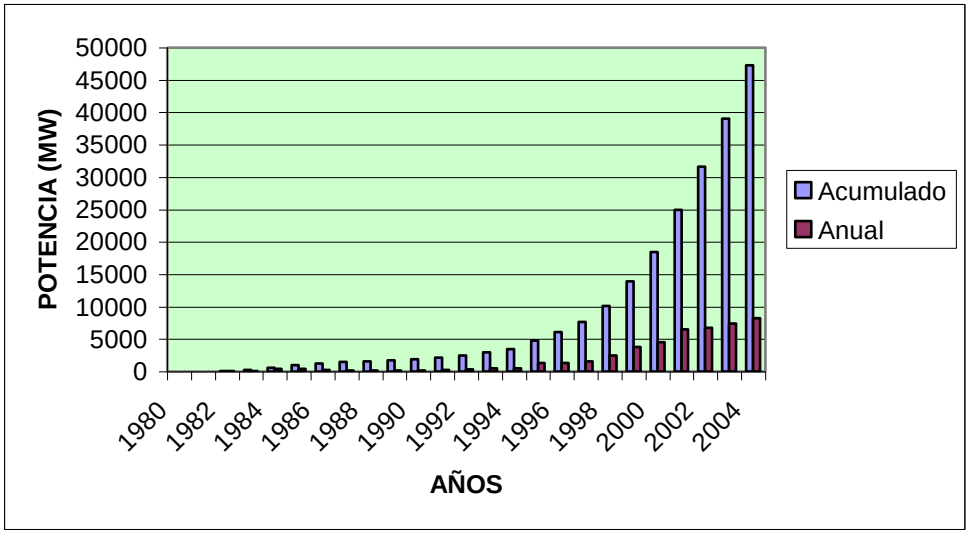
Está surgiendo un consenso internacional respecto al cambio climático que manifiesta que seguir como hasta ahora no es una opción válida y que el mundo debe cambiar a una economía basada en energías limpias.

La energía eólica es una herramienta poderosa para el desarrollo sustentable. Su desarrollo debería ser adoptado como una prioridad energética en cada país. El medio ambiente, la industria y la economía pueden obtener beneficios notables a través de un plan de fomento de su uso.

El mercado mundial de sistemas eólicos ha crecido 100 veces en los últimos 20 años. La industria eólica instaló 7 976 MW en el 2004, con un crecimiento en la capacidad instalada del 20%. A fines del 2004, la capacidad alcanzó los 47 317 MW.

El crecimiento medio anual del mercado europeo es de 35% y el de los Estados Unidos de Norteamérica 23% en los últimos 5 años. España posee actualmente unos 7000 Megavatios de energía eólica instalada, más de lo que cualquiera de nuestros países posee en total como capacidad instalada de energía eléctrica.

Figura 2: Potencia instalada mundial de energía eólica en MW (1980 – 2004)



Fuente: Global Wind Energy Council, 2005

2. GLOSARIO DE TÉRMINOS TÉCNICOS

Debido a la gran diversidad de especialidades técnicas que utilizan el presente manual, es necesario comenzar con una lista de definiciones que ayudarán a comprender mejor los términos técnicos utilizados.

1. *Aerodinámica:* Es la parte de la física que trata el movimiento del aire y los efectos producidos por su acción en los cuerpos.
2. *Aerogenerador (turbina eólica):* Dispositivo mediante el cual se puede llevar a cabo la captación de la energía eólica para transformarla en energía eléctrica.
3. *Aerogenerador de eje horizontal:* Es aquel en el que la corriente de aire es paralela al eje de rotación de los álabes (palas) de la turbina.
4. *Aerogenerador de eje vertical:* Es aquel en el que la corriente de aire es perpendicular al eje de rotación de los álabes (palas) de la turbina.
5. *Alabes o palas*: La superficie aerodinámica que atrapa el viento.
6. *Anemómetro:* Instrumento de medición de la velocidad de viento. Los más utilizados son los anemómetros de tres copas o cazoletas.
7. *Angulo azimutal*: El azimut solar es el ángulo en el plano horizontal entre el sur y el sol en el momento de tiempo para el que ha introducido sus datos. El ángulo es positivo antes del mediodía y negativo después del mediodía (independientemente del hemisferio)
8. *Área (barrido) del rotor*: El área que cubre al girar el rotor del aerogenerador, calculada con la fórmula $A = \pi R^2$, donde R es el radio del rotor
9. *Bosque o parque eólico:* Emplazamiento de dos o más aerogeneradores.
10. *Cargas (fuerzas) de fatiga:* Fuerzas fluctuantes a las que está sujeto un aerogenerador, sobre todo en emplazamientos turbulentos.
11. *Cimentación:* Fundamento para instalar un aerogenerador, normalmente hecho de hormigón armado.
12. *Clase de rugosidad:* O longitud de rugosidad, es el conjunto de condiciones eólicas de un paisaje. Una alta rugosidad de clase 3 ó 4 se refiere a un paisaje con muchos árboles y edificios, mientras que a la superficie del mar le corresponde una rugosidad de clase 0. Las pistas de hormigón de los aeropuertos pertenecen a la clase de rugosidad 0.5, al igual que un paisaje abierto y llano.
13. *Coeficiente de potencia del rotor*: La razón de la potencia extraída del viento por una turbina eólica y la potencia disponible en la corriente de viento. Se divide la potencia eléctrica disponible por la potencia eólica de entrada, para medir como de técnicamente eficiente es un aerogenerador.
14. *Corrosión:* La corrosión es definida como el deterioro de un material metálico a consecuencia de un ataque electroquímico de su entorno. La experiencia de las plataformas petrolíferas marinas ha demostrado que pueden ser correctamente protegidas utilizando una protección catódica (eléctrica) contra la corrosión.
15. *Curva de potencia:* Una gráfica mostrando la potencia obtenida en un aerogenerador a través de un rango de velocidades.
16. *Densidad de aire*: La cantidad de masa contenida en una unidad de volumen.

17. *Deslizamiento (del generador):* La velocidad de un generador asíncrono varía con la fuerza de giro (momento, o par torsor) que se le aplique. Es la diferencia entre la velocidad de rotación síncrona a potencia máxima y en vacío, alrededor de 1 por ciento.
18. *Desviación:* Una protección pasiva del aerogenerador que típicamente hace que el rotor se doble ya sea hacia arriba o hacia un lado mediante la veleta de la cola.
19. *Diámetro del rotor:* El diámetro del círculo barrido por el rotor.
20. *Distribución de Rayleigh:* Es cuando el parámetro de forma (distribución de Weibull) es exactamente 2.
21. *Distribución de Weibull:* Es el gráfico que muestra la variación del viento en un emplazamiento típico.
22. *Efecto de la estela:* Dado que un aerogenerador produce energía a partir de la energía del viento, el viento que abandona la turbina debe tener un contenido energético menor que el que llega a la turbina. O sea, habrá una estela tras el aerogenerador, es decir, una larga cola de viento bastante turbulenta y frenada, si se compara con el viento que llega a la turbina.
23. *Efecto túnel*: Se presenta, por ejemplo, cuando se toma un camino entre dos edificios altos o en un paso estrecho entre montañas; se observará que el aire se comprime en la parte de los edificios o de la montaña que está expuesta al viento, y su velocidad crece considerablemente entre los obstáculos del viento.
24. *Emplazamiento:* Lugar en donde se va a instalar un aerogenerador o un bosque eólico.
25. *Factor de carga*: Es la producción anual de energía dividida por la producción teórica máxima, como si la máquina estuviera funcionando a su potencia nominal (máxima) durante las 8766 horas del año.
26. *Factor de disponibilidad*: Es la razón entre el tiempo real de funcionamiento de un aerogenerador y su disponibilidad máxima En la práctica, este factor es menor a uno porque los aerogeneradores necesitan reparación e inspección una vez cada seis meses para asegurar que siguen siendo seguros. Además, las averías de componentes y los accidentes (fallos de suministro eléctrico) pueden inutilizar los aerogeneradores.
27. *Frenos:* Varios sistemas usados para frenar la rotación del rotor.
28. *Góndola:* El cuerpo de una turbina eólica tipo-hélice, conteniendo la caja de engranajes, el generador, el núcleo del rodete, y otras partes. En aerogeneradores de imanes permanentes, ya no es necesaria la caja de engranajes.
29. *Ley de Betz*: Esta ley dice que sólo puede convertirse menos de 16/27 (59 %) de la energía cinética en energía mecánica usando un aerogenerador.
30. *Mapa o Atlas Eólico:* Es la totalidad de las mediciones de energía eólica realizados en un país o región, sistematizados en un libro. El Mapa o Atlas es muy importante porque ahorra costos a los desarrolladores de proyectos y a los inversionistas.
31. *Multiplicador (caja de engranajes):* Con un multiplicador se hace la conversión entre la potencia de alto par torsor, que se obtiene del rotor del aerogenerador girando lentamente, y la potencia de bajo par torsor, a alta velocidad, que se utiliza en el generador eléctrico.
32. *Obstáculo:* Cualquier elevación del terreno o construida, tal como edificios, árboles, formaciones rocosas, etc. que pueden disminuir la velocidad del viento de forma significativa y a menudo crean turbulencias en torno a ellos.
33. *Pérdida de sustentación (Stall):* Es cuando la sustentación derivada de la baja presión en la superficie superior del álabe desaparece. La pérdida de sustentación puede ser provocada si la

superficie del álabe del rotor no es completamente uniforme y lisa. Una mella en el álabe, o un trozo de cinta adhesiva, pueden ser suficiente para iniciar una turbulencia en la parte trasera, incluso si el ángulo de ataque es bastante pequeño.

34. *Perfil aerodinámico:* La forma de la sección transversal de los álabes o palas, la cual para los aerogeneradores de eje horizontal más modernos, está diseñada para aumentar el empuje y mejorar su funcionamiento.
35. *Potencia nominal:* Por ejemplo, si un aerogenerador tiene una potencia nominal (la que figura en la placa) de 1000 kW, indica que producirá 1000 kilovatios-hora (kWh) de energía por hora de funcionamiento, cuando trabaje a rendimiento máximo (es decir, con vientos de, digamos, más de 15 metros por segundo)
36. *Ráfaga:* Momentos de viento en los cuales cambia rápidamente la velocidad y la dirección predominante. En áreas cuya superficie es muy accidentada y tras obstáculos como edificios, también se producen este tipo de turbulencias, con flujos de aire muy irregulares, con remolinos y vórtices en los alrededores
37. *Razón de la velocidad de punta:* La velocidad lineal a la que se mueve la punta del alabe dividida entre la velocidad del viento. Es por lo regular un requerimiento de diseño del aerogenerador.
38. *Regulación por cambio del ángulo de paso (Pitch control):* Es un tipo de control de potencia, por la cual el controlador electrónico de la turbina comprueba varias veces por segundo la potencia generada. Cuando ésta alcanza un valor demasiado alto, el controlador envía una orden al mecanismo de cambio del ángulo de paso, que inmediatamente hace girar los álabes del rotor ligeramente fuera del viento. Y a la inversa, los álabes son vueltas hacia el viento cuando éste disminuye de nuevo.
39. *Regulación por pérdida aerodinámica (Stall control):* Es otro tipo de control, por el cual se asegura que, en el momento en que la velocidad del viento sea demasiado alta, se creará turbulencia en la parte del álabe que no da al viento. Esta pérdida de sustentación evita que la fuerza ascensional del álabe actúe sobre el rotor.
40. *Rosa de los vientos:* Sirve para mostrar la información sobre las distribuciones de velocidades del viento y la frecuencia de variación de las direcciones del viento. Se basa en observaciones meteorológicas.
41. *Rotor:* El componente rotativo de un aerogenerador, incluyendo ya sea a los álabes y su ensamble, o la porción rotatoria del generador.
42. *Sustentación (lift):* Fuerza de empuje hacia arriba que permite al avión volar o a los álabes girar. La sustentación es perpendicular a la dirección del viento.
43. *Torre:* Es la parte del aerogenerador que soporta la góndola y el rotor. En los grandes aerogeneradores, las torres tubulares pueden ser de acero, de celosía o de hormigón. Las torres tubulares tensadas con cables sólo se utilizan en aerogeneradores pequeños.
44. *Turbulencia:* Los cambios en la dirección y velocidad del viento, frecuentemente ocasionados por obstáculos.
45. *Veleta:* Instrumento utilizado para medir la dirección del viento en cualquier momento. Normalmente va unido a un anemómetro.
46. *Velocidad de arranque*: La velocidad del viento a la cual el aerogenerador empieza a generar electricidad.
47. *Velocidad de corte*: La velocidad del viento de parada cuando el aerogenerador experimenta altas velocidades del viento, de unos 25 m/s, para evitar posibles daños en la turbina o en sus alrededores.

48. *Velocidad de paro*: La velocidad del viento a la cual el aerogenerador deja de generar electricidad.
49. *Velocidad del rotor*: El número de revoluciones por minuto del rotor del aerogenerador.
50. *Velocidad promedio de viento*: La velocidad media del viento sobre un periodo de tiempo especifico.
51. *Viento corriente abajo, sotavento*: En el lado opuesto de la dirección desde la cual está soplando.
52. *Viento corriente arriba, barlovento*: En el mismo lado de la dirección de donde el viento está soplando.

Como referencia, también pueden utilizar los siguientes glosarios:

- **Glosario de energía eólica**, elaborado por Windpower (Dinamarca): http://www.windpower.org/es/glossary.htm
- **Wind Energy Glossary**, elaborado por la Universidad de Dakota del Norte: http://www.undeerc.org/wind/literature/Wind_Glossary.PDF
- **Glossary of Terms and Acronyms**, elaborado por Windustry y American Wind Energy Association http://www.windustry.com/resources/glossary.htm

3. CONCEPTOS BASICOS

3.1 ¿Qué es la energía eólica?

La energía eólica es la energía que posee el viento. El término eólico viene del latín Aeolicus, perteneciente o relativo a Éolo o Eolo, dios de los vientos en la mitología griega y por tanto, perteneciente o relativo al viento. La energía eólica ha sido aprovechada desde la antigüedad para mover los barcos impulsados por velas o hacer funcionar la maquinaria de molinos al mover sus aspas. Es un tipo de energía limpia.

En la tierra, el movimiento de las masas de aire se debe principalmente a la diferencia de presiones existentes en distintos lugares de ésta, moviéndose de alta a baja presión. Este tipo de viento se llama **viento geoestrófico**.

En el presente manual estudiaremos la generación de energía eléctrica a partir de la energía del viento, por eso, nos interesa más el origen de los vientos en zonas mas especificas del planeta, éstos son los llamados **vientos locales**. Entre éstos están las *brisas marinas* que se deben a la diferencia de temperatura entre el mar y la tierra, también están los llamados *vientos de montaña* que se producen por el calentamiento de las montañas y esto afecta en la densidad del aire, haciendo que el viento suba por la ladera de la montaña o baje por ésta dependiendo si es de noche o de día.

Figura 3: Molinos de viento en La Mancha

"¿Ves allí, amigo San Panza, donde se descubren treinta o más desaforados gigantes?"

Don Quijote de La Mancha,
Miguel de Cervantes Saavedra

Fuente: centros5.pntic.mec.es

Fuente: www.implantecoclear.org

Figura 4: Molino tipo holandés

3.2 Tipos de aerogeneradores

Los molinos de viento existen desde hace mucho tiempo. Incluso, hace unos 2000 años atrás, ya se utilizaba el molino de vela de Creta y hace unos 500 años se utilizaba el molino en Holanda (Figura 3). Los sistemas eólicos que estudiaremos son aquellos de **pequeña potencia** y los hemos limitado a potencias iguales o menores a 1000 Watts ó 1 Kilowatt.

Los modelos comerciales más utilizados en la actualidad, son aquellos llamados **sistemas eólicos de propulsión**, entre los cuales podemos enumerar a:

- ☑ **Molinos multiálabe de tipo americano (girasol) para bombeo de agua:** Estos molinos son mecánicos (no

eléctricos) y construidos para durar por décadas. El diámetro del rotor va desde 1 a 8 metros, el número de álabes es de 16 a 32, y su potencia es hasta de unos cuantos cientos de vatios (W). Trabajan a bajas velocidades. Aún se fabrican en países como Argentina, Estados Unidos y Australia (Figura 4)

Fuente: www.sapiensman.com

Figura 5: Molino tipo americano

- ☑ **Molinos modernos para bombeo de agua:** Con el fin de ahorrar dinero, por lo general son más livianos y giran más rápido y el número de álabes es menor (entre 4 y 8). Además, ya no son mecánicos sino eléctricos. Ver Figura 5.

- ☑ **Cargadores eólicos:** Estos son máquinas rápidas y modernas. El diámetro del rotor oscila entre 1 y 7 metros y genera una potencia de hasta 10 kW. Sirven para aplicaciones autónomas que requieren poca energía como refrigeradoras, sistemas de alumbrado, bombas de agua eléctricas, telecomunicaciones, etc. Ver Figura 6.

Fuente: www.invap.net

Figura 5: Molino moderno para bombeo de agua

Fuente: www.isolener.com

Figura 6: Cargador eólico

- ☑ **Aerogeneradores grandes (también llamados SCEE o WECS en inglés):** Son Sistemas de Conversión de Energía Eólica de 1 MW hasta 5 MW, generalmente acoplados a una red eléctrica. Ver Figuras 7 y 8.

Fuente: www.geasl.com

Figura 7: Aerogenerador de gran potencia

Fuente: www.belt.es

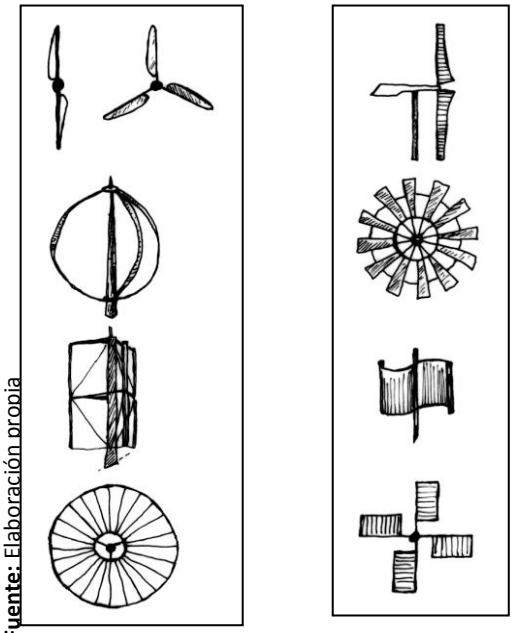
Figura 8: Bosque o parque eólico

Esto no significa que otros tipos de aerogeneradores no sean útiles, por ejemplo el **aerogenerador Darrieus**, que posee un eje vertical (Figura 9). Sin embargo, después de haber probado con una enorme cantidad de tipos de molino, el aerogenerador de propulsión ha demostrado ser el mejor (por esa razón son tan populares en el mundo entero); lo que quiere decir que si alguien trata de venderle un aerogenerador que no sea del tipo de propulsión, tiene derecho a desconfiar. Infórmese primero: ¿Cuántos de éstos se han instalado y dónde?, ¿La curva de potencias ha sido calculada por un instituto independiente?, etc.)

Vea la siguiente figura, para una mejor vista de las características aerodinámicas de los diversos aerogeneradores existentes.

Fuente: www.udo-leuschner.de

Figura 9: Aerogenerador tipo Darrieus



Fuente: Elaboración propia

Figura 10: Características de varios molinos de viento

Por supuesto, debemos hacer una clasificación del tamaño de estos sistemas, para situarnos en el contexto del presente manual. De ahora en adelante, cuando hablemos de sistemas eólicos, nos referiremos a los **aerogeneradores de pequeña potencia**.

Cuadro 1: Clasificación* de sistemas eólicos por potencia

Clase de aerogeneradores	Rango de Potencia (kW)
Pequeña potencia	0.1 – 10
Mediana potencia	11 – 1000
Gran potencia	Más de 1000

Nota: 1 kW = 1000 W
(*) Clasificación según el autor

Si toda la información precedente es registrada en un cuadro, se obtiene:

Cuadro 2: Aerogeneradores más importantes

Tipo	Americano	Nuevo diseño	Cargador eólico	WECS
Uso	Bombeo de agua		Generación de electricidad	
Diámetro Rotor	2 – 8	2 – 8	1 – 7	10 - 60
Número de Palas	12 - 32	4 - 8	2 - 3	2 - 3
Altura de torre	6 - 15	6 - 15	4 - 20	20 - 60
Potencia	hasta 300 W	hasta 300 W	hasta 10 kW	hasta 1 MW
Material	Acero	Acero	Acero, poliéster	Madera, plástico

3.3 Aplicaciones de los sistemas eólicos

La energía eólica se utiliza comúnmente en:

a) Electricidad en el sector rural (domiciliario, agricultura, ganadería, etc.)
b) Electricidad para estaciones científicas en zonas aisladas
c) Telecomunicaciones
d) Pequeña industria
e) Señalización luminosa
f) Energía mecánica (bombeo de agua)
g) Interconexión a la red (mayormente equipos de gran potencia)

3.4 Posibilidades y limitaciones

Antes de decidirse a usar la energía eólica, usted deberá pensarlo muy bien. A pesar de que la energía eólica es una tecnología renovable y amiga del ambiente, un motor Diesel podría ser simplemente más barato. ¡O quizás no hay posibilidades de mantenimiento a molinos! Si está pensando en utilizar energía eólica, debe considerar cuidadosamente lo siguiente:

Fuente: Elaboración propia

Figura 11: Saber elegir

Velocidad promedio del viento

Dado que la potencia del viento es proporcional al cubo de la velocidad del viento, es muy importante conocer la velocidad del viento para saber si la energía eólica es rentable. El Cuadro 3 presenta una relación general.

Suministro y demanda

Las reglas dadas anteriormente pueden usarse para obtener un primer cálculo de la potencia promedio del viento, la que puede compararse con la demanda de potencia. Si hay suficiente potencia sobre la base de un año, entonces debe hacerse el análisis por meses. ¿Cuáles son las variaciones del suministro y la demanda a lo largo de los meses? ¿Los patrones son similares? ¿Si no son similares, que sucedería durante el mes más crítico? ¿Qué cantidad de almacenamiento se requiere?

No olvide que un almacenamiento de más de unos cuantos días es, por lo general, poco factible en términos económicos.

Cuadro 3: Viabilidad de la energía eólica de acuerdo al viento existente

Velocidad promedio anual medido a 10 m.	Posibilidades de usar la energía eólica
Menos de 3 m/s	No muy factible, a menos que existan circunstancias especiales
3 - 4 m/s	Podría ser una opción para aerobombas, pero no para los aerogeneradores.
4 - 5 m/s	Las aerobombas podrían competir con los equipos Diesel, los aerogeneradores autónomos pueden ser una opción
Más de 5 m/s	Factible, tanto para aerobombas como para aerogeneradores
Más de 6 m/s	Factible para aerobombas, aerogeneradores autónomos y conectados a red.

Infraestructura de mantenimiento

¿Qué sucede si un aerogenerador se malogra? ¿Hay los repuestos disponibles? ¿Hay un taller a una distancia razonable?

Familiaridad con la tecnología

Es importante saber si las personas están familiarizadas con la energía eólica. Si no lo están, se deberá poner mucho interés en explicar los puntos esenciales necesarios para evitar que el proyecto falle.

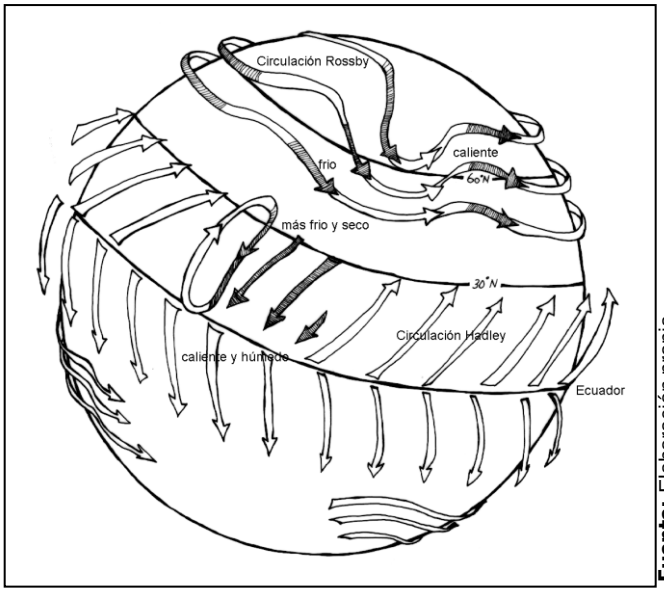
Otras opciones

Uno siempre debe fijarse en otras opciones. Tal vez la energía eólica no sea una buena idea bajo ciertas circunstancias.

4. EL VIENTO: RECURSO ENERGÉTICO

En resumen, la energía eólica es energía solar. El sol provoca diferentes temperaturas en el aire que rodea a la tierra, lo que origina que haya regiones con baja y alta presión. Estas zonas de presión, junto con el movimiento rotativo de la tierra, crean los principales sistemas de viento (ver Figura 12)

Para tener una idea de la velocidad del viento, se ha incluido un mapa mundial eólico (Figura 13) y uno de América del Sur (Figura 14).



Fuente: Elaboración propia

Figura 12: Sistemas globales de viento

4.1 Datos de la velocidad del viento

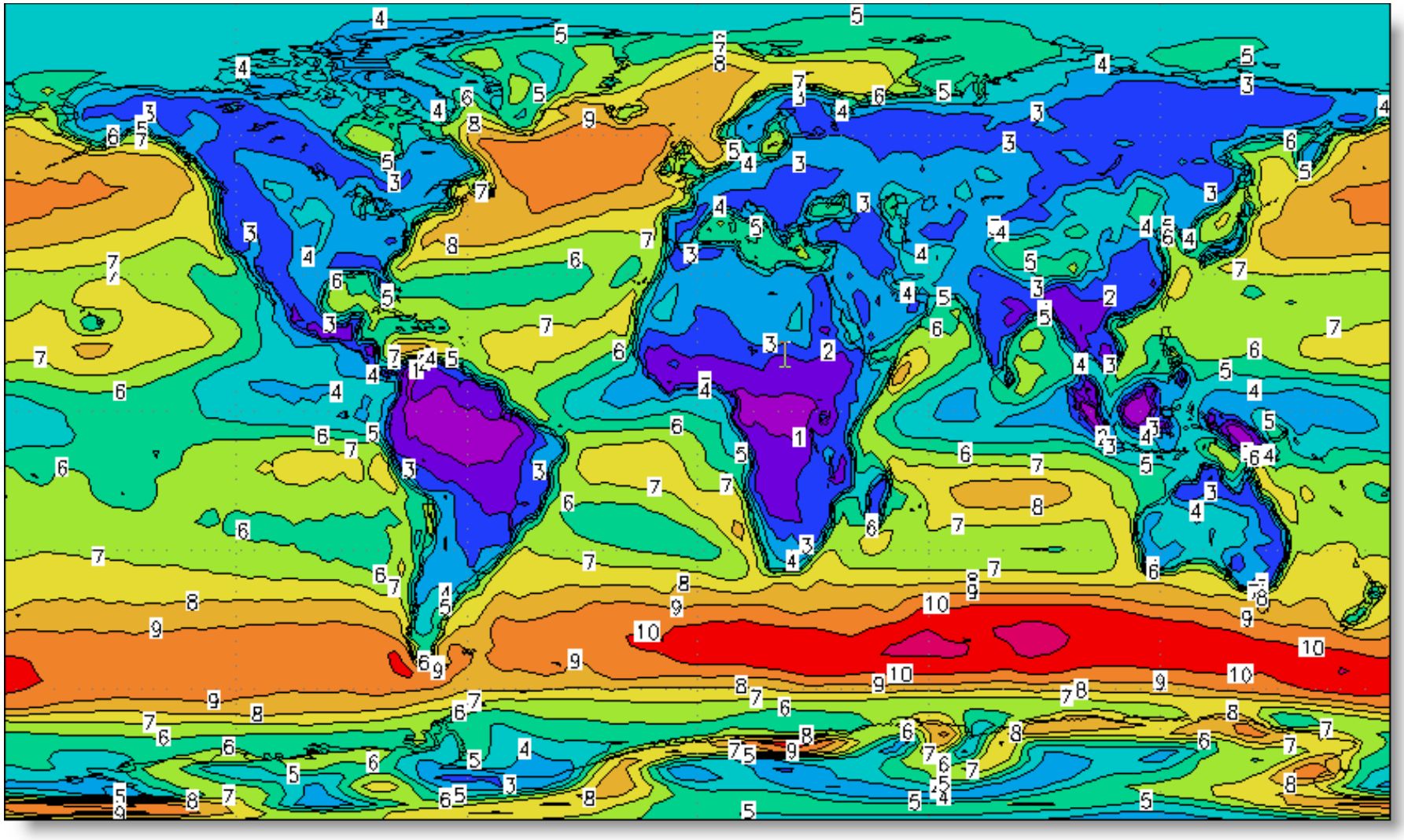
Para determinar cuáles son las posibilidades de energía eólica, uno necesita tener datos de la velocidad del viento. Lo mejor es hacer las mediciones en el lugar donde se llevará a cabo el proyecto. A veces esto no es posible: alguien debe ir hasta allá a colocar equipos de medición (costosos) y por lo menos deben registrarse datos durante unos cuantos meses. Por lo tanto, en la mayoría de los casos, la primera opción es obtener datos de una estación meteorológica. El Estado y las Fuerzas Armadas generalmente poseen estaciones de medición de viento. Los aeropuertos también suelen ser una alternativa.

En el caso ideal, los datos obtenidos de una estación meteorológica pueden ser utilizados para evaluar el régimen del viento en el lugar proyectado. Sin embargo, primero deben hacerse algunas revisiones. Los datos de una estación meteorológica cercana deben ser complementados con datos del propio lugar.

Escala de Beaufort

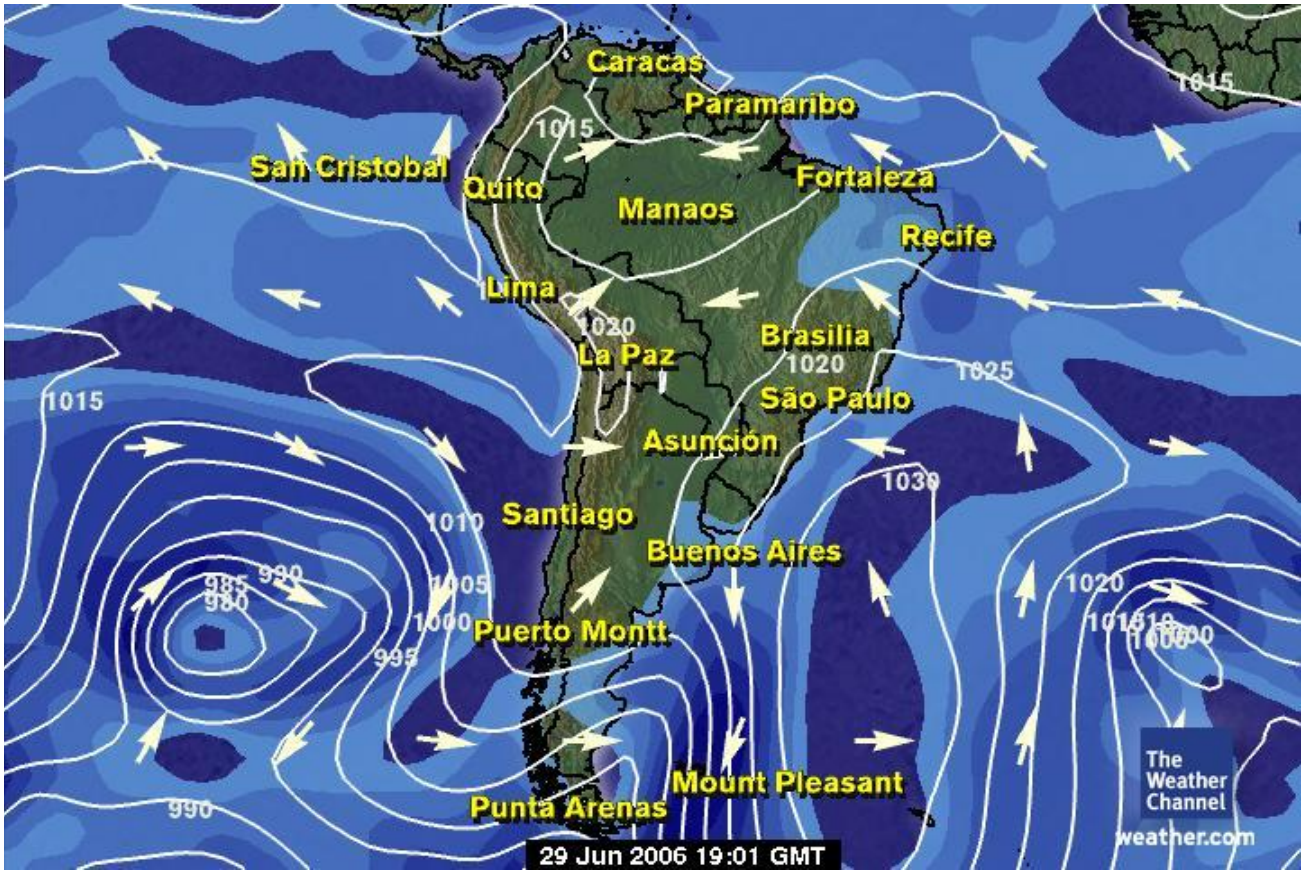
En un inicio, las velocidades del viento se medían con la mano, especialmente desde la superficie del mar, porque las mediciones de la velocidad del viento eran importantes para los barcos. El aspecto de la superficie del mar era utilizado (qué tan grandes eran las olas, si había o no espuma) para establecer la velocidad del viento. Esta es la conocida **Escala de Beaufort**, que va de 0 (no hay viento) hasta 17 (ciclón). Posteriormente la escala fue adaptada para su uso en tierra (ver Anexo 1)

Figura 13
Mapa Eólico Mundial



Fuente: www.windatlas.dk

Figura 14
Mapa Eólico de Sudamérica



Fuente: español.weather.com

Para darse una idea de lo que las cifra de la Escala de Beaufort significan en m/s, uno puede utilizar la siguiente fórmula de aproximación:

$$V_{SI} = 2.8\, V_B - 3 \qquad (1)$$

Donde:

V_B = velocidad del viento en unidades Beaufort
V_{SI} = velocidad del viento en m/s

Por lo tanto, la fuerza del viento 6 (el viento silba a través de los árboles y cables, los paraguas se sostienen con dificultad) es equivalente a una velocidad de viento aproximada de 14 m/s (el rango exacto es de 10.8 - 13.8 m/s)

NOTE que la fórmula anterior sólo proporciona un estimado. Para conversiones exactas de datos, vea el Anexo 1.

Aunque los observadores experimentados dicen ser capaces de calcular con exactitud la velocidad del viento utilizando la media unidad Beaufort, la Escala de Beaufort es reemplazada cada vez más por las mediciones en m/s, que son más objetivas.

4.2 Unidades

La unidad más común para expresar la velocidad del viento es el metro por segundo [m/s]. Sin embargo, actualmente hay otras unidades en uso. El Cuadro 4 contiene un listado de algunas de ellas:

Cuadro 4: Unidades utilizadas para medir velocidad de viento

DESIGNACIÓN	EXPLICACIÓN	CONVERSIÓN
m/s km/h mph	Metro por segundo Kilómetro por hora Milla por hora	 1 km/h = 0.278 m/s 1 mph = 0.447 m/s

Es posible también que se hayan hecho mediciones del soplar del viento, es decir, que se haya medido la cantidad de kilómetros de viento que circuló.

Ejemplo de la medición de la velocidad del viento

Suponga que la velocidad del viento es medida cada 3 horas. Para uno de esos períodos de 3 horas, los datos registrados son los siguientes:

⇒ A las 15:00 hrs, velocidad del viento: 157.3 km/h
⇒ A las 18:00 hrs, velocidad del viento: 215.8 km/h

La cantidad de viento que pasó en este período fue de: 215.8 - 157.3 = 58.5 km. Una distancia de 58.5 km en 3 horas significa una velocidad del viento de 58.5/3 = 19.5 km/h, o (multiplique por 0.278): 5.42 m/s.

4.3 Mediciones de energía eólica

La medición del viento de acuerdo a los estándares de la Organización Mundial de Meteorología (WMO, en inglés) para las estaciones meteorológicas es un asunto complicado, pues todos los detalles y requerimientos se remiten a la "Guía de Instrumentos y Métodos de Observación Meteorológicos" de la WMO[1].

Velocidad del viento y dirección

Un primer método para conocer la velocidad y dirección aproximadas del viento en una determinada área, consiste en observar el paisaje y las deformaciones de los árboles y arbustos (vea la Figura 15). Si los árboles se ven marcadamente deformados por el viento, ello le dará una idea del viento y de su fuerza.

[1] Esta Guía la podrán encontrar en la página web de la WMO: www.wmo.ch

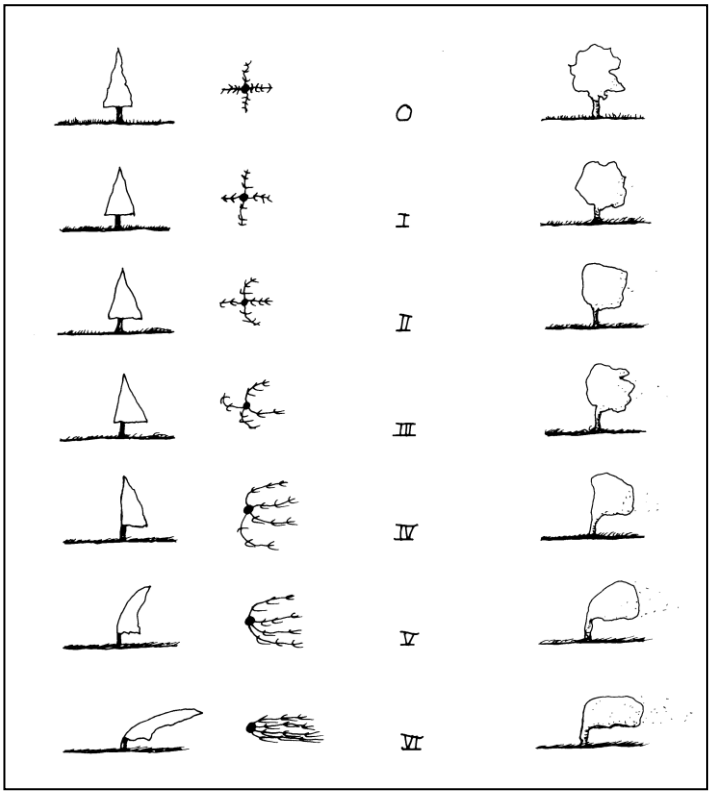


Figura 15: Determinación aproximada de velocidad y dirección de viento

Fuente: Elaboración propia

Fuente: www.infomonitors.com

Figura 16: Anemómetro de taza

4.4 Instrumentos de medición

Hay muchos instrumentos que miden la velocidad del viento y la dirección del mismo. El instrumento más común es el **anemómetro de taza** (vea la Figura 16). La velocidad de la taza es del orden de la velocidad del viento. Mientras que el anemómetro está girando, se van generando pulsaciones eléctricas, las mismas que son contabilizadas.

El aparato sólo mide la velocidad del viento horizontalmente, pero es independiente de su dirección. Es importante que el anemómetro tenga un momento de inercia (sea de construcción liviana), pues un anemómetro pesado tenderá a sobreestimar la velocidad del viento.

Debido a que no se mide la dirección del viento, es necesario contar con una veleta especial (Figura 17)

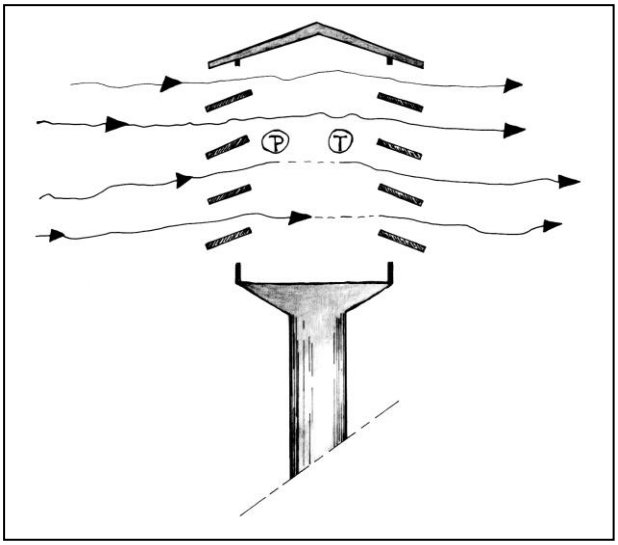
Figura 17: Diversas formas de veletas

Fuente: decoparque.com.ar

Fuente: www.windpower.org

Temperatura y presión

La energía del viento es proporcional a la densidad del aire. Por lo tanto, es importante medir la presión del aire y también la temperatura. Generalmente, ambas son medidas en lugares protegidos del sol (pero no del viento), a más o menos 2 metros sobre el nivel del suelo (Figura 18)



Fuente: Elaboración propia

Figura 18: Medición de la presión y la temperatura

La densidad del aire está dada por:

$$\rho = 1.225 \frac{288.15}{T} \frac{B}{1013.3} \qquad (2)$$

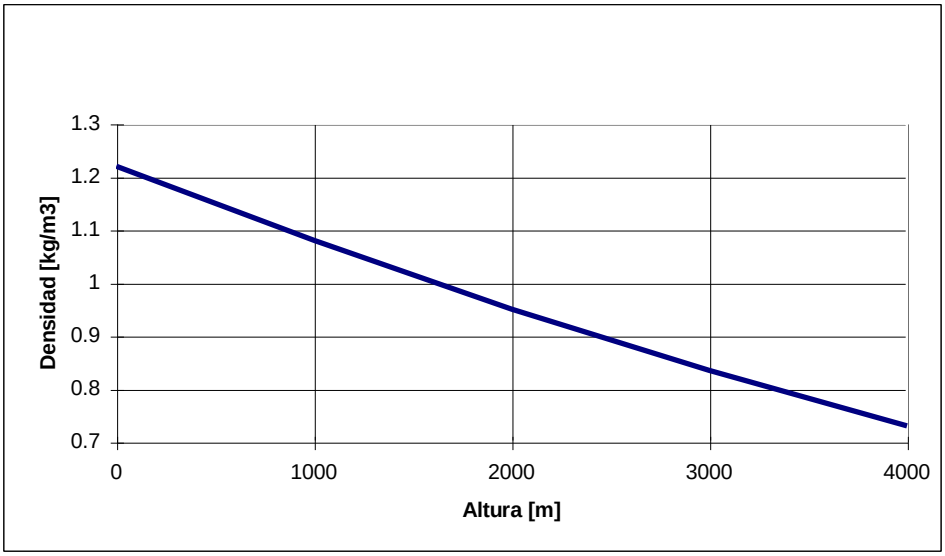
Donde:

B = Presión barométrica [mbar]
T = temperatura del aire [K]
ρ = densidad del aire [kg/m^3]

La temperatura en grados Kelvin [K] se obtiene sumando 273.15 a la temperatura en centígrados [^{o}C]. Por lo tanto, 15 °C corresponde a 15 + 273.15 = 288.15 °K.

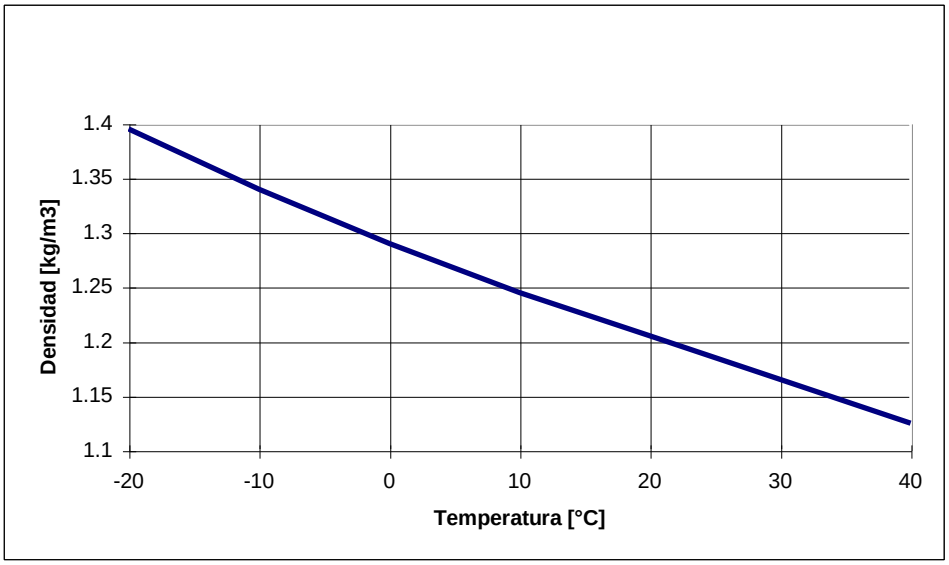
Es importante notar la influencia de la temperatura y la presión en la energía de salida (ver Anexo 2 para los cuadros). Sobre todo a temperaturas más altas y a grandes altitudes, la energía de salida de los aerogeneradores es más baja que a temperaturas promedios al nivel del mar (ver Figuras 19 y 20)

Figura 19: Influencia de la altitud sobre la densidad del aire y la potencia



Fuente: Elaboración propia

Figura 20: Influencia de la temperatura sobre la densidad del aire y la potencia



Fuente: Elaboración propia

Ejemplo (ver Anexo 2)
Asumamos que se propone aplicar energía eólica en una localidad a 200 m de altitud. Entonces la densidad del aire es en promedio ρ = 1.006 kg/m^3 en vez de 1.225 kg/m^3 a nivel del mar. Esto significa 18% menos densidad = 18% menos de potencia.

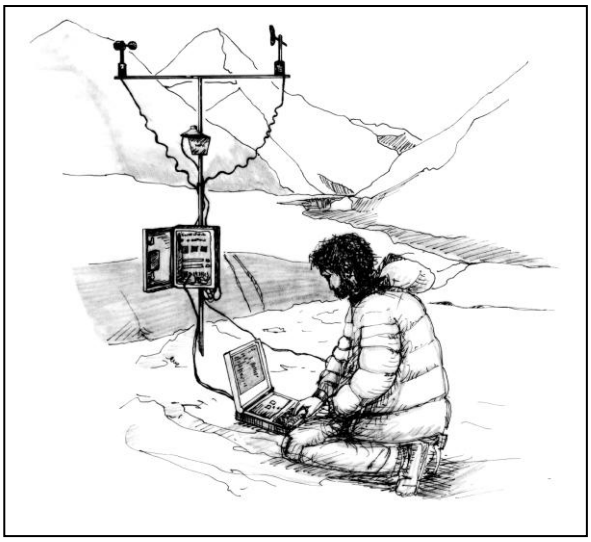
Exactitud

¿Cuál es el grado de exactitud debe exigirse al realizar mediciones? Esto depende por supuesto de lo que se hará con los datos y de la cantidad de dinero disponible para los equipos de medición.

Para la confiabilidad del estudio, un promedio de error en la velocidad del viento de +/– 0,5 m/s es aceptable. Si uno mide el funcionamiento de máquinas, un pequeño porcentaje de error en la potencia es probablemente una buena opción, resultando como admisibles errores de 1% en la velocidad del viento (porque la velocidad del viento aparece al cubo en la potencia), unos 3 grados en la temperatura (1%), y 0.01 bar en la presión (1%). Los aparatos deben calibrarse regularmente para asegurar que cubran los requerimientos.

Almacenamiento de datos

Antiguamente los datos se registraban a mano, con cuadros y, hasta hace último, con equipos automáticos llamados data loggers. La tecnología ha avanzado y ahora los acumuladores de datos ya vienen integrados dentro de la estación de medición, mediante modernas memorias, que arrojan datos finales al técnico.



Fuente: Elaboración propia

Figura 21: Transferencia de información del equipo de medición a una laptop

Estas memorias son básicamente pequeñas computadoras que leen los datos de entrada de un número de sensores a intervalos específicos y hacen cálculos sencillos de procesamiento (como promediar, mantener valores extremos, cambiar unidades, etc.)

Almacenamiento

¿Qué cantidad de almacenamiento debe tener una memoria? La información se almacena en bytes que, en cifras, puede concebirse entre 0 y 225. Si se sabe que la velocidad del viento está entre 0 y 25 m/s, las mediciones pueden hacerse con una resolución absoluta de 25/256 = 0.1 m/s. La resolución relativa es 1/256 = 0.004 = 0.4%.

Suponiendo que este 0.4% es aceptable, esto significa que sólo se necesita 1 byte de almacenamiento para cada medición. Si hay 5 señales que deben registrarse cada 10 minutos durante 30 días, entonces calculamos la capacidad necesaria de almacenamiento. Un período de 30 días posee 30 x 24 x 6 = 4,320 intervalos de 10 minutos. Con 5 señales, esto significa 4,320 x 5 = 21,600 mediciones. Como se requería 1 byte para cada medición, la capacidad de almacenamiento que se necesita es de 21,600 bytes = 21.6 Kbytes.

4.5 ¿Cómo se mide la velocidad del viento?

¿Cómo se debe medir la velocidad del viento de manera que podamos usarla para predecir la potencia de salida de un aerogenerador? ¿Cómo estar seguros de que los datos son suficientemente buenos?

La velocidad del viento en un lugar determinado depende de:

- El clima
- Los obstáculos
- La altura
- El tipo de terreno

El tiempo

La velocidad del viento puede medirse durante una cantidad de tiempo indeterminada. Podemos medir cada segundo, o podemos medir el promedio en un año. Si uno desea evitar demasiados datos y tener una velocidad de viento adecuada para predecir la salida, podría utilizarse un intervalo entre 1 y 3 horas.

Esto no significa que recolectar datos durante períodos más largos con el fin de obtener un promedio hace a los datos menos útiles. En realidad, para regímenes de viento, puede ser suficiente tener sólo un promedio anual.

Tipo de terreno

Al aproximarse a la superficie del terreno, el viento baja de velocidad (ver Figura 23) ¿Cuánto baja la velocidad? Eso depende de la rugosidad del terreno. Por ejemplo, los terrenos agrícolas con cultivos altos, tienen un mayor efecto de disminución de velocidad que los terrenos desérticos y planos, sin vegetación.

La noción de rugosidad del terreno puede describirse cuantitativamente, asignando una altura de rugosidad z_0 al terreno en el Cuadro 5 (ver Figura 22)

Cuadro 5: Clasificación del terreno y rugosidad

CLASE	DESCRIPCIÓN DEL TERRENO	z_o [m]
1	Agua, un alcance de 5 km mínimo	0.0002
2	Planos de lodo, nieve, sin vegetación, sin obstáculos	0.005
3	Abiertos y planos, hierba, algunos obstáculos aislados	0.03
4	Cultivos bajos, obstáculos grandes ocasionales, x/h > 20	0.10
5	Cultivos altos, obstáculos muy dispersos, 15 < x/h < 20	0.25
6	Área de parques, arbustos, muchos obstáculos, x/h = 10	0.5
7	Cobertura regular de grandes obstáculos (suburbios, bosques)	1.0
8	Centro de la ciudad con construcciones altas y bajas	> 1.0
x = dimensión horizontal del obstáculo (largo/ancho) h = altura del obstáculo		

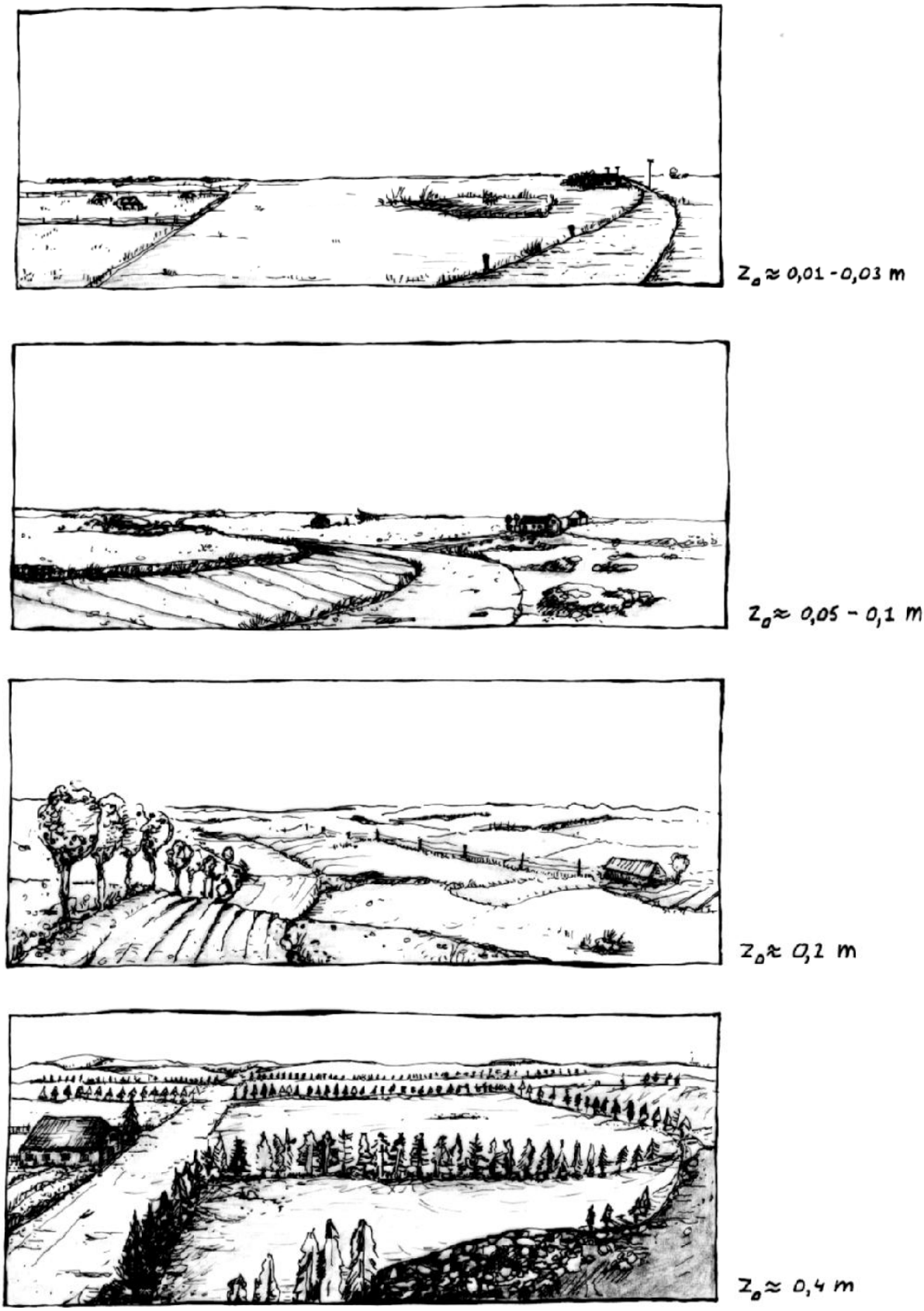
La rugosidad del terreno es una altura que se asocia con la presencia de más o menos obstáculos continuos. No es la altura del obstáculo. La rugosidad del terreno puede estimarse alrededor de:

$$\mathbf{z_o} = \frac{\mathbf{b} \times \mathbf{H}}{2} \qquad (3)$$

Donde:

b = parte del terreno cubierto por obstáculos representativos [-]
H = altura del obstáculo representativo [m]

Figura 22: Clases de paisaje. La rugosidad (z_0) del terreno determina cuán frenado está el viento

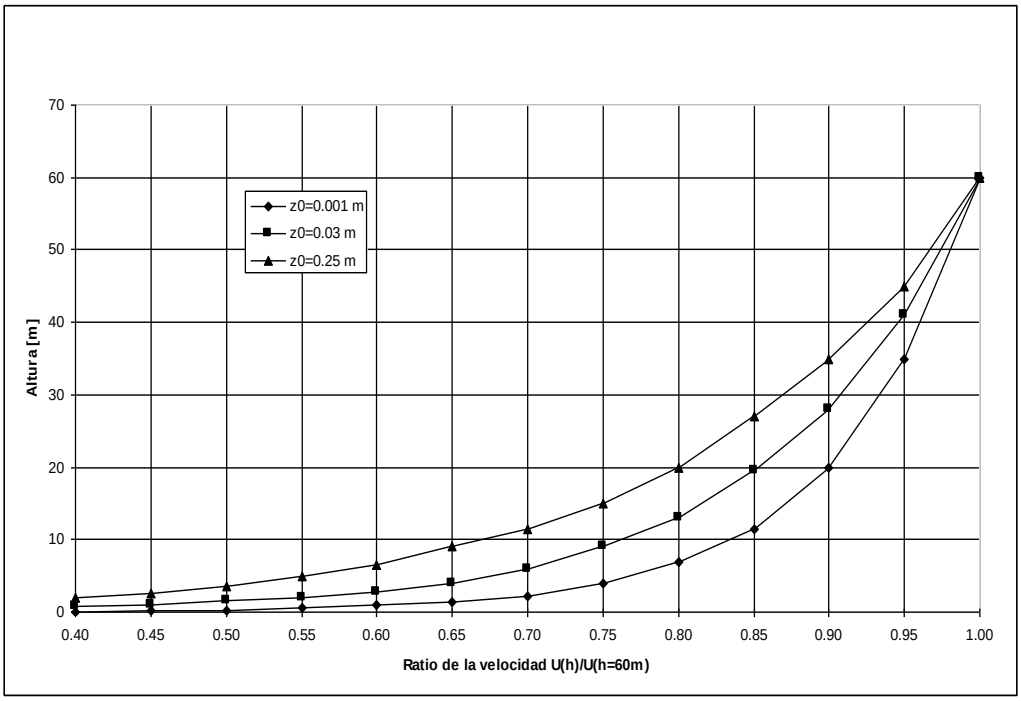


La rugosidad del terreno es comúnmente determinada para sectores de 30 a 45 grados. Idealmente, debería derivarse de la ráfaga del viento, que tiene una relación directa con la rugosidad del terreno.

Ejemplo:
Supongamos que 10% del terreno en un sector de 30 grados está cubierto de árboles de 8 metros de altura, entonces la rugosidad del terreno estimada es de z_o = (0.1 x 8)/2 = 0.4 m

Vea la Figura 23 para los perfiles de viento. A 60 metros de altura, la velocidad del viento puede considerarse como independiente del terreno local

Figura 23: Perfiles logarítmicos de la velocidad del viento. El perfil depende de la rugosidad del terreno



Fuente: Elaboración propia

Si se conoce la rugosidad del terreno y la velocidad del viento U_1 a una altura h_1, la velocidad del viento U_2 a una altura h_2 puede hallarse utilizando la siguiente fórmula y la Figura 24:

$$U_2 = U_1 \frac{\ln(h_2 / z_0)}{\ln(h_1 / z_0)} \qquad para 20\, z_0 < h < 60\ [m] \qquad (4)$$

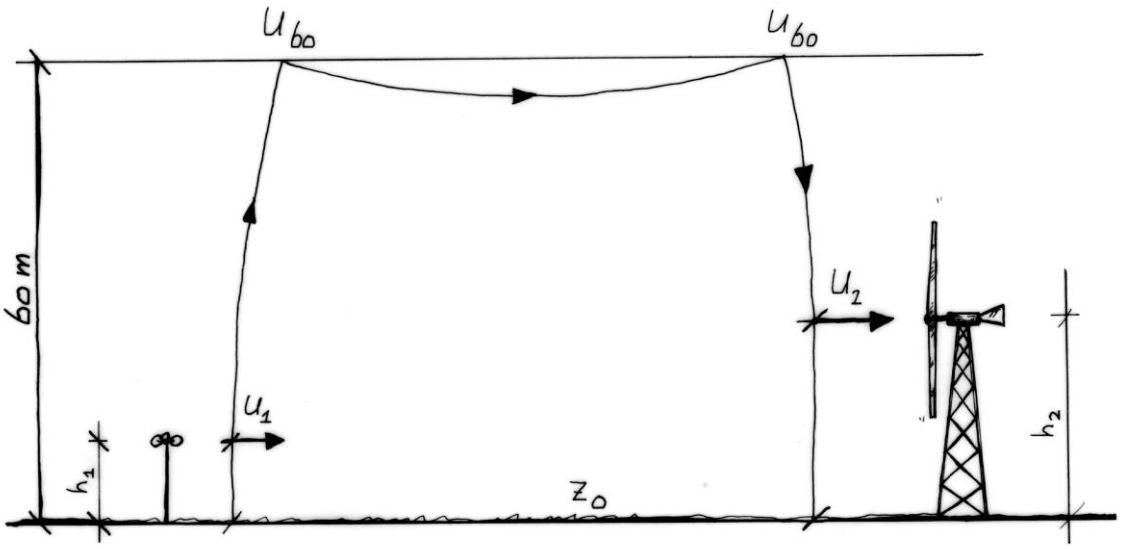
Donde:

h = altura sobre el nivel de suelo [m]
U_1 = velocidad del viento a altura h_1 [m/s]
U_2 = velocidad del viento a altura h_2 [m/s]
z_o = rugosidad del terreno [m]

Nota 1: Este perfil de viento es válido sólo si la frontera de la capa de la atmósfera no es inestable, es decir, que no hay transporte vertical de aire debido a diferencias en la temperatura. La inestabilidad se da si el suelo está caliente en comparación con el aire sobre él.

Nota 2: Si el suelo está cubierto de obstáculos continuos (como tierras de cultivo) es mejor definir el nivel del suelo a 0.5 – 0.7 veces la altura del obstáculo.

Figura 24: Cálculo de la velocidad del viento potencial



Fuente: Elaboración propia

Obstáculos

El viento debe medirse en un lugar libre de obstáculos. Los obstáculos producen un fenómeno en el cual el viento adopta cualquier dirección y velocidad, y no es posible corregir con exactitud la influencia del obstáculo.

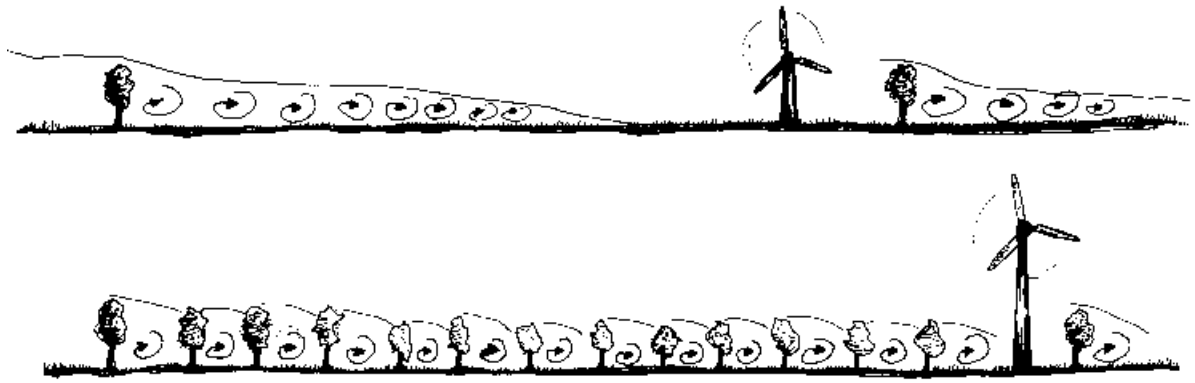
Las mediciones son posibles si el anemómetro está a una altitud mayor que la del obstáculo, pero generalmente no queremos tener obstáculo alguno. Si hay obstáculos muy cerca, lo más adecuado será considerar inservibles las mediciones de la velocidad.

Si hay un edificio con una altura H, la velocidad del viento debe medirse a una altura de 4H y por lo menos 20H detrás del edificio, lo que significa que, para un edificio de 10 metros, la torre meteorológica debe estar a 40 m de altura, y por lo menos 200 m detrás del edificio. Si uno desea medir a 2H = 20 m, el anemómetro debe estar por lo menos (digamos) a 40 - 50H = 400 - 500 m detrás del edificio. Con frecuencia la gente no se da cuenta de la influencia real de un obstáculo (ver las Figuras 25 y 26)

Se piensa que en los aeropuertos se pueden obtener buenos datos acerca de la velocidad del viento, puesto que generalmente están ubicados en terrenos planos. Sin embargo, olvidamos que también existen muchos edificios, que pueden obstruir al viento que viene de una dirección en particular.

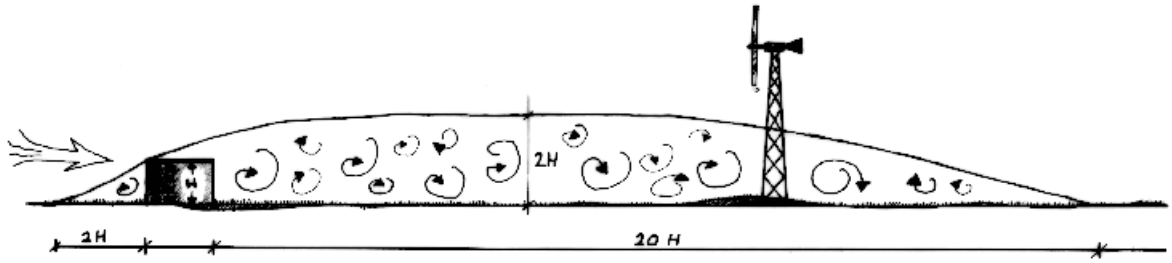
No hay nada mejor que medir la velocidad del viento en la ubicación del aerogenerador a la altura del eje del rotor (de preferencia por lo menos durante un año)

Figura 25: Influencia de obstáculos



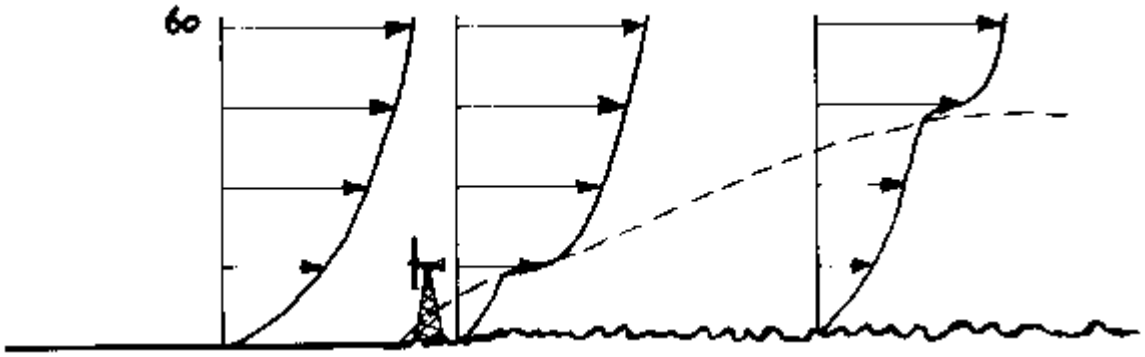
Fuente: Elaboración propia

Figura 26: Influencia de obstáculos
Note la gran zona de influencia (hasta 20 veces la altura del obstáculo)



Fuente: Elaboración propia

Figura 27: Influencia de un cambio del terreno. A 60 m de altura la velocidad del viento es independiente del terreno



Fuente: Elaboración propia

4.6 Verificación de los datos registrados

Si es posible, se debe visitar la estación meteorológica de la que se utiliza información. Si esto no es posible, debemos contentarnos con una descripción. ¿Qué información se necesita?

Altura del anemómetro

Es muy importante conocer a qué altura se realizan las mediciones de viento. Mediciones realizadas a 2 m de altura (para fines agrícolas) son inútiles para aplicaciones eólicas. Entonces: ¿cuál es la altura del anemómetro?

Ubicación del anemómetro

Uno debería incluso conocer dónde se ubica el anemómetro. ¿Está en un lugar libre, sobre una torre o sobre un edificio? Si está sobre un edificio, ¿cuáles son las dimensiones de éste y qué tan alta es la torre sobre el edificio? Un anemómetro instalado a una distancia equivalente a una vez el ancho del techo, podría aún experimentar vórtices (turbulencias) desde el edificio, dando un error del 15% sobre la velocidad.

Exposición del anemómetro

El anemómetro debería estar bien expuesto al viento desde todas las direcciones. Un mapa de los alrededores (1:10,000) debe tenerse a la mano ofreciendo información acerca de la rugosidad del terreno y edificios a 1 – 2 Km. de la estación.

Cambios en el ambiente

Sucede con frecuencia que el área alrededor de la estación meteorológica se llena gradualmente de edificios, generando una aparente baja en la velocidad del viento. Básicamente cualquier cambio ambiental dentro de 2 Km. de la estación deberían tomarse en cuenta y registrarse. Esto puede referirse a nuevas construcciones, pero también así un campesino ha decidido cultivar maíz en lugar de papas (¡diferencia en la altura de los cultivos!)

Descripción del instrumental

Para todos los detalles, referirse a la OMM (Organización Mundial de Meteorología). Lo más importante es:

- ¿Cuál es el intervalo de calibración del equipo?
- ¿Cuándo fue la última vez que el equipo fue calibrado?
- ¿Están los anemómetros y sensores de dirección de viento libres de polvo?
- ¿Cuál es el método de registro? (¿Sabía que si se leen cuadros, los observadores tienden a registrar más los números pares que los impares?)
- ¿Cuál es el umbral inicial del anemómetro?

Datos

- (Nuevamente) ¿Para qué altura son los datos?
- ¿En qué unidad se registran?
- ¿Son los datos corregidos de la norma de la OMM (velocidad potencial del viento) o no?
- ¿Cuál es el intervalo de registro? ¿Hay datos de ráfagas?

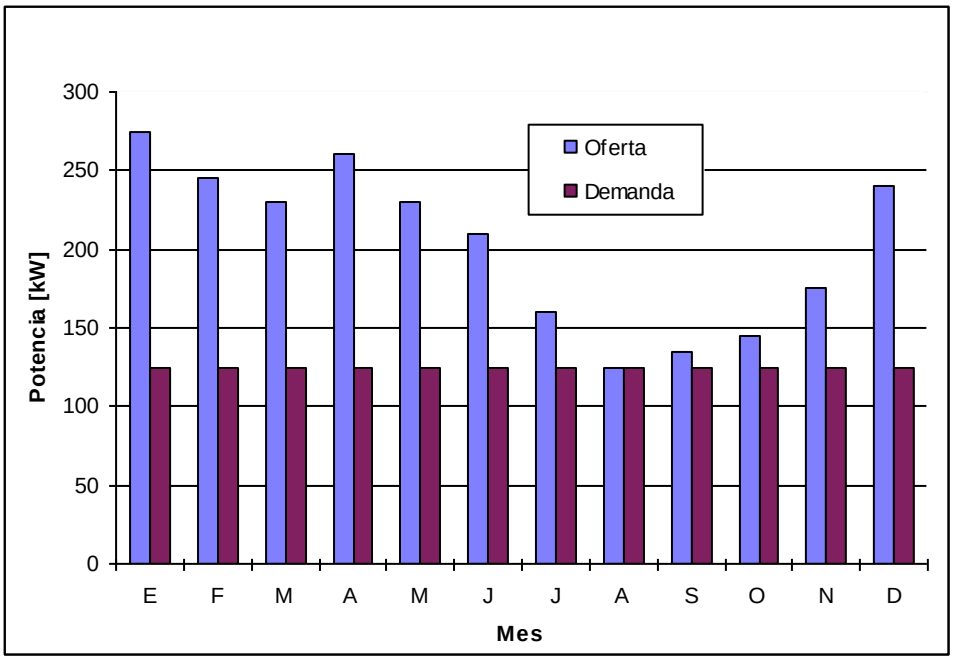
4.7 Distribución de la velocidad del viento

El viento no es constante, su velocidad varía constantemente, entonces hay que tomar en consideración las fluctuaciones y periodos sin viento cuando se diseñe y se instale un sistema eólico

Períodos sin viento

Los más importantes son los períodos donde no hay viento. Si hay dos meses sin viento en los que (digamos) la mayor cantidad de agua debe bombearse, entonces la utilización de energía eólica no será aplicable, a pesar de un promedio alto de viento (ver Figura 28).

Figura 28: El mes crítico (agosto)



Fuente: Elaboración propia

Patrón anual

Al considerar la energía eólica uno debe identificar el mes crítico o crucial, es decir, el mes con la mayor demanda de energía y la velocidad de viento más baja.

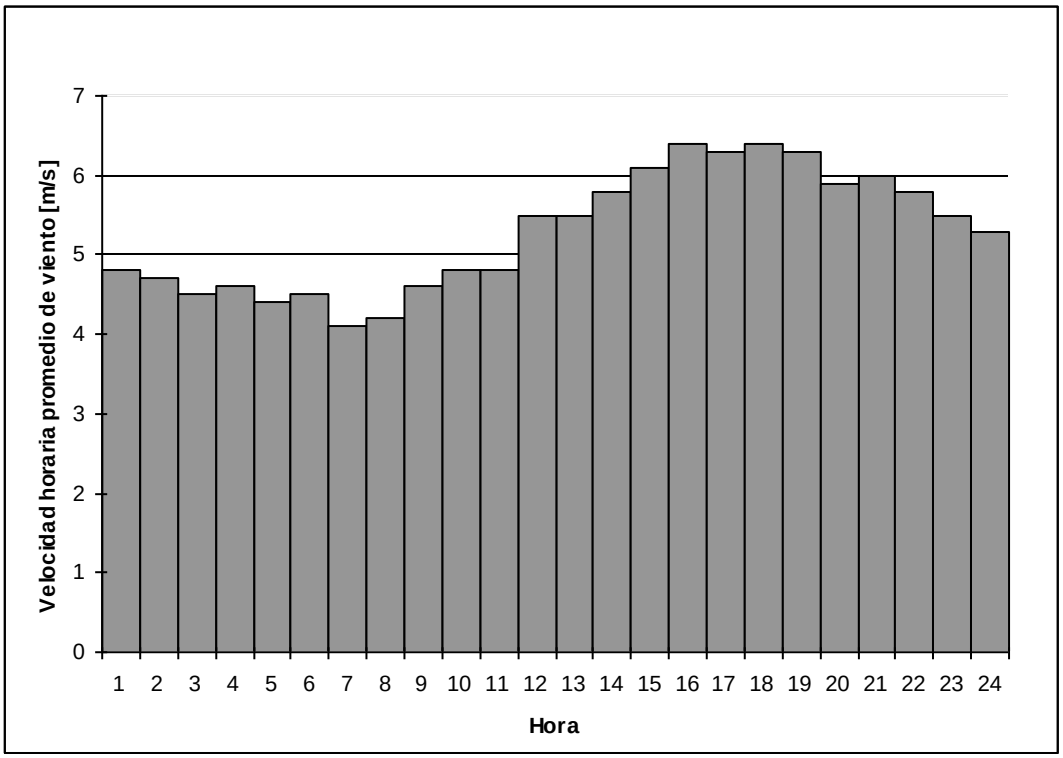
Adormecimiento

Aún más uno debe considerar la posibilidad de días sin viento. ¿Cuántos ocurren consecutivamente? ¿Es posible dejar de contar con viento por dicho período? La cantidad de días sin viento puede determinar el almacenamiento que debe hacerse o si se requiere de un sistema de apoyo.

Patrón diario

Es posible que el viento tenga patrones diarios distintos: por ejemplo sólo hay viento durante el día pero no durante la noche. Debe investigarse si el patrón de viento coincide con el patrón de demanda o no (ver Figura 29).

Figura 29: La velocidad del viento durante el día



Fuente: Elaboración propia

4.8 Conclusiones

Este capítulo hace un listado de los pasos a seguir si la conveniencia de una ubicación para un aerogenerador debe ser juzgada. Este diagrama de flujo es sólo para el viento. Un lugar puede no ser conveniente por otras razones: tal vez el lugar es inasequible, las facilidades para realizar los trabajos de mantenimiento muy escasos, o la extensión de la red resulta una mejor solución.

Calcule la velocidad del viento a partir de un mapa a gran escala.

Obtenga datos de una estación meteorológica cercana al lugar.

- Averigüe a qué altura fueron registrados los datos y en qué unidad.
- De ser posible visite la estación para una revisión. Especialmente revise la ubicación del anemómetro y los obstáculos.

Visite el lugar escogido y busque indicadores de la velocidad del viento en el terreno).

Trate de calcular la velocidad del viento en el lugar a partir de los datos de la estación. Para terrenos accidentados esto puede resultar difícil o imposible, pero trate de estar lo más cerca posible. Combine su cálculo con la información obtenida anteriormente.

Dependiendo del proyecto (estudio de factibilidad, instalación de algunos aerogeneradores pequeños, construcción de un parque eólico, etc.) decida si son necesarias las mediciones en el lugar. Si lo son, llévelas a cabo.

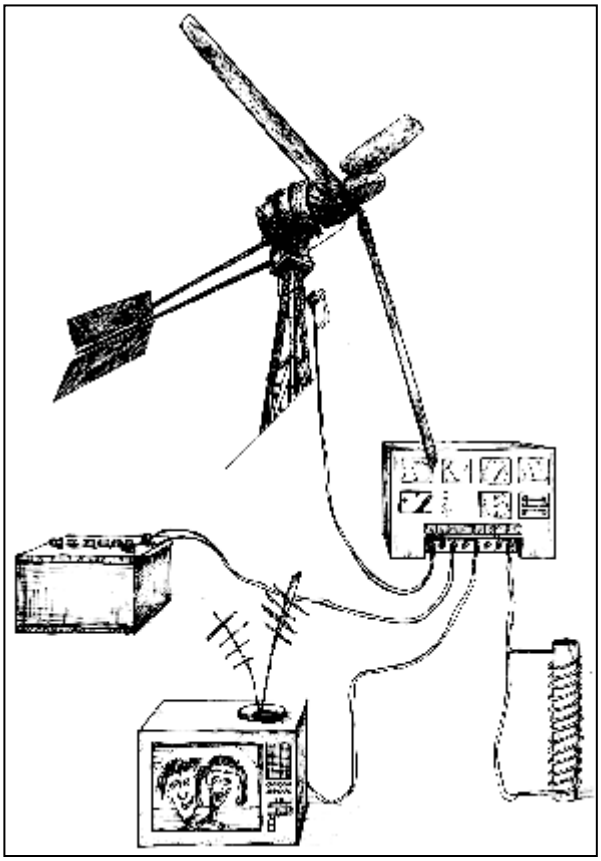
Decida si el lugar elegido es conveniente en lo que se refiere al régimen de viento (haga un cálculo del producto de salida del aerogenerador).

5. ¿COMO OPERAN LOS SISTEMAS EÓLICOS?

5.1 Introducción

Vea la Figura 30 para darse una idea general de los componentes del sistema.

Figura 30: Vista general del sistema



Fuente: Elaboración propia

Estos componentes son:

1. Turbina de viento (generador) ➔ Función: generar electricidad. La turbina de viento generalmente incluye un rectificador para obtener corriente directa de 12V ó 24V.
2. Unidad de control ➔ Función: mantener el voltaje correcto, protección contra sobrecarga y descarga de baterías. Posible frenado del rotor.
3. Baterías ➔ Función: almacenamiento de energía para períodos sin viento.
4. Dispositivos para DC de 12 o 24 V.

Otros componentes podrían ser:

1. Dump load (balastro) ➔ Función: tomar la electricidad si la batería está llena y la producción es mayor que el consumo.
2. Inversor ➔ Función: convierte la corriente directa a 110 o 220 V (corriente alterna).
3. Dispositivos para AC de 220 V.

5.1.1 Rotor

La función del rotor es la de extraer energía del viento de la manera más eficiente, mientras mantiene las fuerzas del rotor mismo y las de todo el aerogenerador en mínimo.

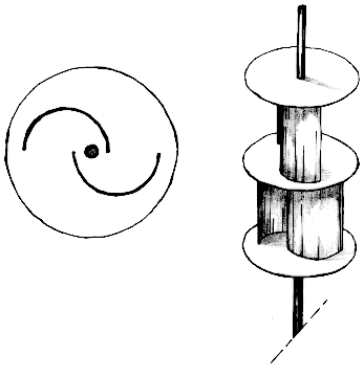
Los rotores más comunes son:

a. Savonius de eje vertical (Figura 31)

b. Tipo hélice de eje horizontal (Figura 32)

c. Darrieus de eje vertical (Figuras 33 y 34)

Figura 31: Rotor Savonius



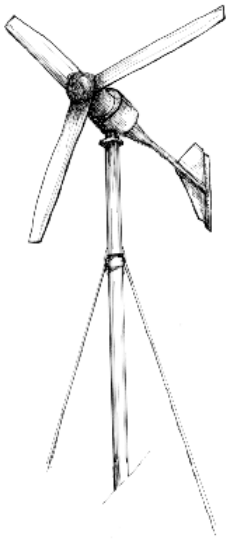


Figura 32: Tipo hélice de eje horizontal

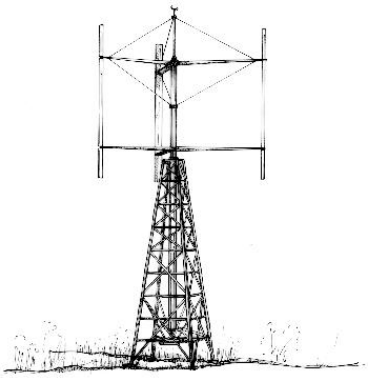


Figura 33: Rotor Darrieus convencional

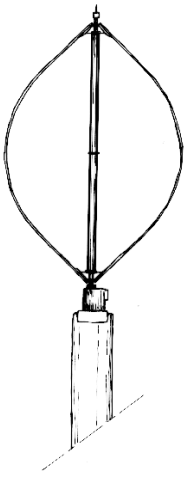


Figura 34: Rotor Darrieus alternativo

Fuente: Elaboración propia

De estos tres tipos, el de tipo hélice es el más utilizado. Vamos a ver por qué es esto así.

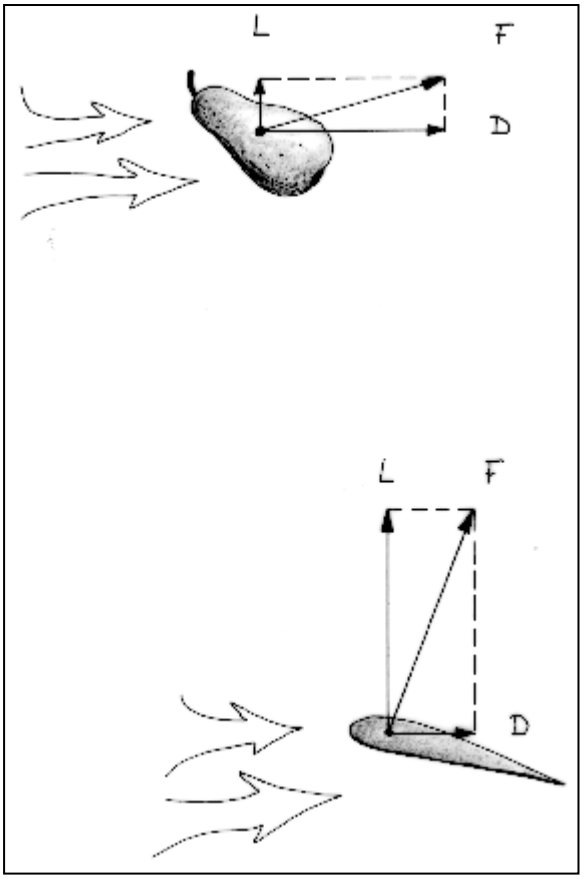
Sustentación y resistencia (arrastre)

Si un objeto es puesto en un flujo de aire (viento), experimentará dos fuerzas: la de subida y la de arrastre (resistencia). Por definición, el arrastre es la fuerza en la dirección del flujo de aire, y la sustentación es la fuerza perpendicular al flujo del viento (ver Figura 35)

Si está manejando un auto y saca la mano por la ventana, el viento la empujará hacia la parte trasera del auto: éste es el arrastre. Las máquinas de arrastre son las más fáciles de entender, y es por eso que los inventores construyen los de este tipo. El rotor de tipo Savonius es una máquina de tipo arrastre.

La sustentación es la fuerza que impide a los aviones caerse en el cielo: porque vuelan a grandes velocidades, se crea una fuerza hacia arriba en las alas, lo que contrarresta la gravedad. Es también la fuerza que hace posible navegar a un barco, incluso contra el viento. El rotor Darrieus y el de tipo hélice son máquinas de tipo sustentación.

Se puede mostrar que usar sustentación permite un mejor funcionamiento que utilizando el arrastre (ver Cuadro 6). Esto no es sólo una cosa práctica sino fundamental. Sin embargo mostrar eso está fuera de los objetivos de este curso.



Fuente: Elaboración propia

Figura 35: Fuerza arriba (lift) y fuerza de resistencia (drag). Cuando se emplea un álabe con buen perfil, la fuerza arriba es mucho más grande que la fuerza de resistencia

Cuadro 6: Eficiencia de máquinas de sustentación y arrastre

TIPO DE PROPULSIÓN	SUSTENTACIÓN	ARRASTRE
Eficiencia máxima (teórica)	16/27 = 59%	30%
Máxima eficiencia (práctica)	50%	15%

A esto debe agregársele que las máquinas de arrastre son menos económicas en el uso de material.

Dos guías importantes

1. Siempre use máquinas de sustentación (tipo hélice)
2. Siempre desconfíe de inventores de máquinas de arrastre

Eje horizontal vs. Eje vertical

No hay una ventaja fundamental en usar máquinas, sea de eje horizontal o de eje vertical. Es sólo una cuestión de conveniencia en la construcción que ha hecho a la turbina de eje horizontal más popular, y ahora tiene la ventaja definitiva de *'haberse mantenido en el medio por tanto tiempo y en grandes cantidades'*, es decir, hay más experiencia con él y en consecuencia mayor confiabilidad.

5.1.2 Características del rotor

La característica más importante del rotor es la curva de potencia/velocidad del viento o **Curva P-V**. Esta curva nos da la potencia extraída del viento como una función de la velocidad del rotor. Las curvas están dadas por la fórmula:

$$P = C_P \frac{\rho}{2} A V^3 \qquad (5)$$

Donde:

A	área barrida por el rotor = ρR^2 [m^2]
C_p	coeficiente de funcionamiento (o de potencia) [-]
P	potencia del eje del rotor [W]
V	velocidad del viento [m/s]
ρ	densidad del aire [kg/m^3]

La cantidad de potencia que es extraída del viento depende de qué tan rápido gira el rotor. Si el rotor está quieto, no está produciendo nada y la potencia es cero. Si el rotor está girando muy rápido, la potencia es también cero. Entre estos dos valores está la velocidad óptima que da una potencia máxima a cierta velocidad de viento.

Teóricamente, el coeficiente C_p nunca puede ser mayor que 16/27 = 0.59. En la práctica valores máximos razonables son (ver Cuadro 7):

Cuadro 7: Coeficiente de funcionamiento

TIPO DE TURBINA	NORMAL	MÁXIMO
Bombas de agua	0.25	0.35
Cargadores de viento	0.35	0.40
Aerogeneradores grandes	0.45	0.50

El Cuadro 7 puede ofrecer la información del fabricante: si su C_p es mayor que los valores detallados en la columna de la derecha, sus figuras son demasiado optimistas (ver Capítulo "Diseño del sistema")

En la práctica casi todas las eficiencias de los sistemas serán mucho más bajas aún, debido a las pérdidas en el generador y porque a velocidades altas de viento, uno no desea toda la potencia que se pueda obtener.

5.1.3 Producción

Para aerogeneradores grandes (D > 20 m), los álabes son hechos de fibra de vidrio reforzado con polyester (como el casco de un barco) o con 'wood-epoxy' (muchas capas finas de enchape pegadas juntas). Dado que la producción es de todos modos un proceso costoso, se hacen muchos esfuerzos en obtener formas torneadas óptimas y perfiles de álabe sofisticados.

Para aerogeneradores pequeños, existen otras posibilidades como el plástico, metal y madera. Para facilitar la manufactura, los álabes generalmente no tienen torsión.

A pesar del hecho de que el aluminio es ligero, no es bueno utilizarlos para los álabes, porque el aluminio siempre fallará bajo eventuales condiciones variables de carga.

5.1.4 Dos preguntas comunes

Aquí hay dos preguntas que frecuentemente se hacen.

¿Por qué algunos rotores tienen sólo dos o tres álabes, mientras que otros tienen muchos?

Si un álabe recibe una cierta cantidad de energía del viento, dos álabes reciben el doble de esa energía, tres álabes el triple y así sucesivamente. Este razonamiento nos llevaría a la conclusión de que rotores con muchos álabes deben usarse todo el tiempo.

Lamentablemente, no hay una respuesta sencilla a esta pregunta. Un parámetro muy importante en la explicación es la velocidad específica de la punta (λ), que es la velocidad de la punta del álabe dividida por la velocidad del viento. Cuando un rotor tiene una gran velocidad específica, eso significa que gira rápido.

Utilizando la aerodinámica puede mostrarse que para altas velocidades específicas de la punta y buenos perfiles de álabe (con alta relación de sustentación/arrastre), no tiene sentido usar muchos álabes, pues pocos de éstos son suficientemente buenos. Para bajas velocidades específicas y malos perfiles (como planchas sencillamente dobladas) muchos álabes dan más energía.

Una explicación intuitiva es la siguiente: si el rotor está girando lentamente sólo con algunos álabes, mucho viento puede pasar a través del rotor sin 'ser visto' por los álabes, Por lo tanto se requieren muchos álabes. Si el rotor está girando rápidamente, pocos álabes son suficientes para 'atrapar' todo el aire.

Un efecto adicional es que cada álabe perturba el flujo de aire del siguiente álabe. Este no es un problema para las aerobombas lentas (que tiene baja eficiencia de todas maneras) pero este efecto si cuenta para los aerogeneradores grandes.

Cuadro 8: Velocidad específica y número de álabes

Velocidad específica	**1**	**2**	**3**	**4**	**5-8**	**8-15**
Número de álabes	6-20	4-12	3-6	2-4	2-3	1-2

¿Por qué tienen torsión los álabes?

Para hacer uso óptimo de las fuerzas de sustentación creadas por el viento, el ángulo entre la cuerda del álabe y la velocidad del viento visto por el álabe (el ángulo de ataque) debe tener cierto valor, generalmente unos pocos grados. El viento incidente en el álabe es la suma vectorial de la velocidad del viento real y la velocidad del álabe mismo. La velocidad del álabe en la ubicación **r** desde el centro del rotor es:

$$V_B(r) = \Omega\, r \qquad (6)$$

Donde:

V_B = velocidad del álabe en ubicación **r** [m/s]
r = radio [m]
Ω = velocidad del rotor [rad/s]

Para obtener el ángulo de ataque óptimo en todos los radios, si la velocidad del álabe cambia con el radio, se requiere la torsión.

Sin embargo, mucho de la energía viene de la parte exterior del álabe, por lo que un álabe sin torsión que es (casi) correcto en la parte exterior, pero no en la interior, puede todavía trabajar bien (y es más fácil de producir energía).

5.1.5 Fuerzas en el rotor

Las fuerzas en el rotor son:

1) Cargas de fatiga (estas cargas no son tan grandes, pero cambian en magnitud todo el tiempo) como:
   - Cargas de viento
   - Gravedad
   - Cargas giroscópicas (cuando el rotor y el cabezal están girando al mismo tiempo)

2) Cargas extremas: en particular, son cargas causadas por posibles velocidades máximas de viento.

En este curso no es posible discutir el tema de la fatiga, pero pueden hacerse cálculos a mano de la carga extrema.

5.2 Sistemas de control y seguridad

Su función es fijar límites en la potencia y en las fuerzas sobre la turbina. La potencia del viento se eleva con el cubo de su velocidad. Suponga que deseamos operar el rotor a su máximo C_P = 0.4 en todos los casos, entonces la potencia (para un rotor con una unidad de área barrida) sería de:

- A 4 m/s: P = 16 W
- A 8 m/s: P = 125 W
- A 12m/s: P = 423 W

Esto significa que toda la turbina debe ser diseñada para tomar una máxima potencia de 423 W, mientras que gran parte del tiempo la potencia es menor a ésta. Está claro que sería poco económico y la potencia a velocidades máximas limitada de alguna manera por el sistema de seguridad.

De otro lado, si queremos obtener la potencia máxima del viento a velocidades de viento menores: el rotor debe mantenerse perpendicular al viento de una manera u otra, por ejemplo con una cola. Frecuentemente este mecanismo es combinado con el mecanismo de seguridad.

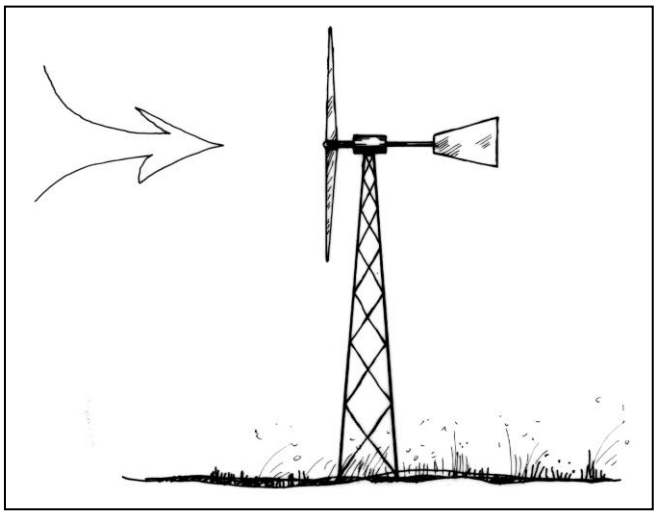
5.2.1 Tipos de sistemas de control y seguridad

Ningún sistema de seguridad

Contradiciendo lo que dijéramos anteriormente, hay algunos aerogeneradores que no tienen sistemas de control/seguridad de potencia. En particular para aerogeneradores pequeños (donde el costo de materiales es relativamente bajo) puede resultar ser una opción simplemente hacer la turbina tan pesada que pueda soportar cualquier carga de viento.

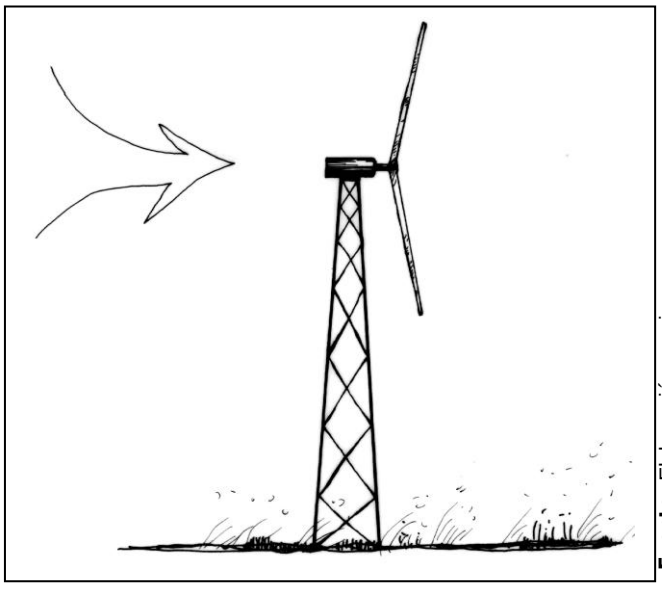
En estos casos se usaría un rotor con cola frente a la torre o un rotor detrás de la torre. La ventaja del rotor detrás de la torre es por supuesto que no se requiere de cola (Figuras 36 y 37)

Figura 36: Rotor barlovento con cola



Fuente: Elaboración propia

Figura 37: Rotor sotavento. No se necesita una cola



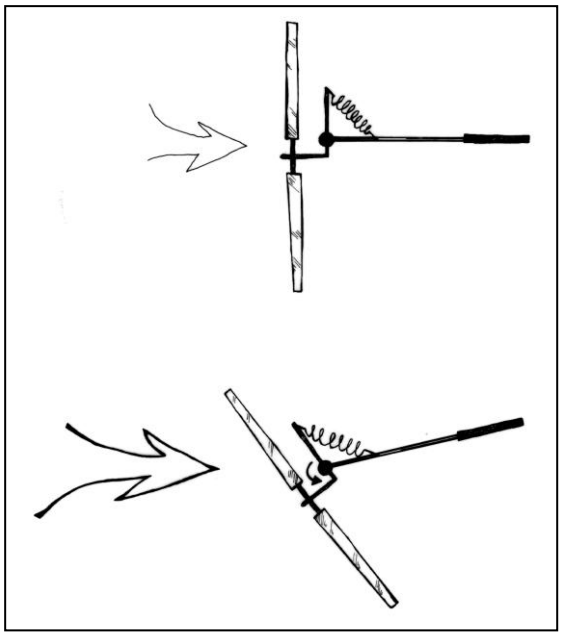
Fuente: Elaboración propia

Sistema de rotor excéntrico

Tan pronto el aerogenerador se hace más grande, algo debe hacerse para limitar la potencia. Una estrategia común es darle al rotor una excentricidad pequeña. La cola se conecta al cabezal con una bisagra.

El viento hará girar el rotor fuera de su dirección si las velocidades se elevan; al mismo tiempo la cola mantendrá la dirección del viento. Si se coloca un resorte entre el cabezal y la cola se crea un equilibrio de momentos (ver Figura 38)

Figura 38: Rotor excéntrico con cola y resorte (vista superior)



Fuente: Elaboración propia

Arriba: velocidad pequeña
Abajo: velocidad grande

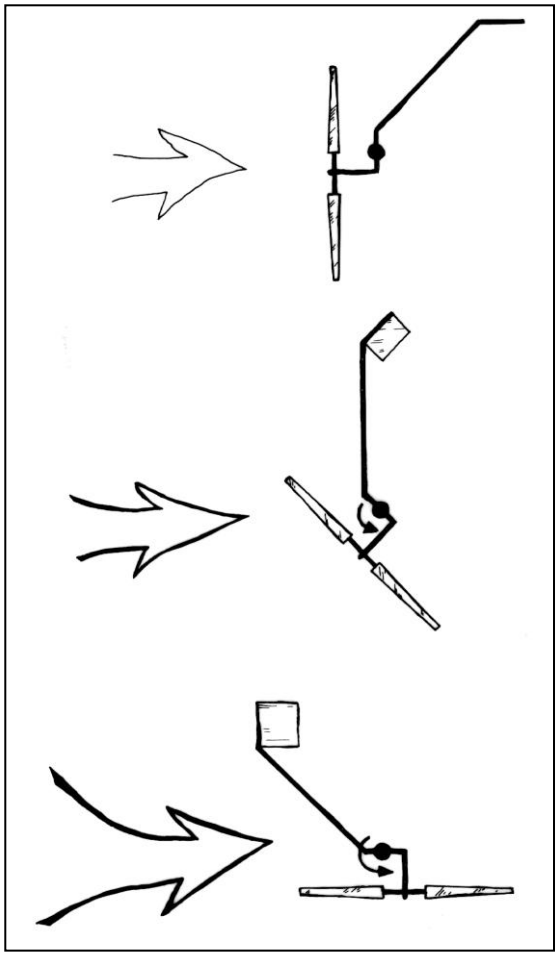
Un sistema muy inteligente es el rotor excéntrico con una veleta lateral con bisagra (ver Figura 39) donde la veleta puede girar sobre un eje horizontal. A velocidades bajas de viento la gravedad mantendrá la veleta en posición vertical y el rotor se mantendrá perpendicular al viento. A velocidades de viento mayores el rotor girará y el viento levantará la veleta. Bajo condiciones de tormenta la veleta estará horizontal y el rotor paralelo al viento.

Figura 39: Sistema con cola rotativa (vista superior)

Arriba: Baja velocidad, el rotor está perpendicular con respecto al viento, la cola está vertical.

Medio: Velocidad moderada, el rotor está girando, la cola está levantada.

Abajo: Alta velocidad, el rotor está paralelo con respecto al viento, la cola está horizontal



Fuente: Elaboración propia

Sistema de control del paso del álabe

En lugar de mover el rotor también es posible girar los álabes. A velocidades de viento altas, el álabe cambia de ángulo para 'dejar pasar' el aire.

Básicamente esta idea no tiene nada de malo, pero en aerogeneradores pequeños los mecanismos de inclinación son generalmente muy costosos y poco confiables. No es tan difícil ver por qué: debido a que los álabes deben girar, se requiere de algún tipo de soporte. Los soportes no funcionan bien cuando no están girando porque no se puede garantizar una buena lubricación. Por tanto tienden a atascarse, especialmente dado que es bastante difícil realmente sellar los soportes del ambiente.

La última observación también es válida para la construcción del contrapeso y el resorte; invariablemente quedan atascados con el polvo y suciedad. Es mejor evitarlos.

5.2.2 Problemas comunes

El sistema de control y seguridad es un sistema de partes movibles, por tanto todo tipo de problemas que ocurren en cualquier sistema pueden ocurrir en este:

- El soporte puede atascarse por falta de lubricación o por causa de la suciedad
- Algunas partes se pueden romper como los resortes y cables
- Todo el sistema puede entrar en resonancia a ciertas velocidades de viento.

Muchas oscilaciones combinadas pueden darse, por ejemplo a través de la interacción al girar el rotor y el movimiento de arriba hacia abajo.

5.3 Generador

La función del generador es convertir la energía rotacional del rotor en energía eléctrica.
Los generadores de mayor uso en aerogeneradores son:

- Generador de imanes permanentes
- Generador asíncrono
- Generador de velocidad variable

Los cargadores eólicos generalmente funcionan con generadores de imanes permanentes; estos generadores pueden funcionar a bajas velocidades de rotación, que hace posible colocar el rotor de la turbina directamente en el eje del generador sin usar una caja de engranajes.

Los aerogeneradores grandes conectados a red, utilizan generadores que no tienen imanes permanentes sino electroimanes (bobinas) en el centro. Estos generadores pueden girar a una velocidad que es diferente por muy poco de la frecuencia de 1,500 r. p. m. de la red, por ejemplo 1,510 o 1,520 r. p. m. En este caso se habla de generadores asíncronos. Si la diferencia con la frecuencia de la red es muy grande, uno habla de generadores de velocidad variable.

5.3.1 Generadores de imanes permanentes

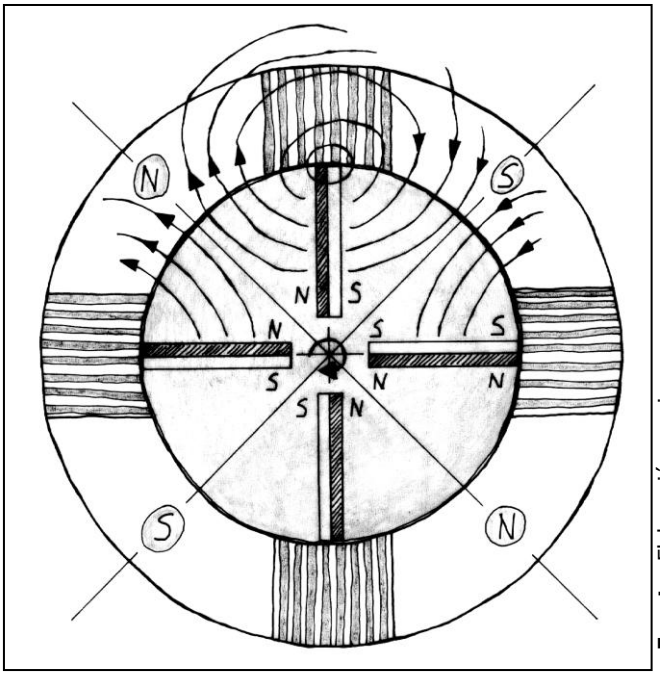
Vea la Figura 40 para una visión general. El centro del generador (también llamado 'rotor') tiene varios juegos de imanes empotrados en hierro dulce que pueden ser magnetizados muy fácilmente.

Figura 40: Generador de imanes permanentes

Fuente: www.servocomm.freeserve.co.uk

El eje está hecho de acero inoxidable no magnetizado. Por tanto se crea un campo magnético como se bosqueja en la Figura 41.

Figura 41: Líneas magnéticas en un generador



Fuente: Elaboración propia

La cantidad de imanes se elige de tal manera, que la máxima fuerza de campo magnético se alcance en las bobinas (llamado 'estator'). Los imanes son colocados de manera oblicua para evitar que el rotor se pegue.

Si el núcleo rota, se crea un campo magnético cambiante en las bobinas, y una corriente alterna se produce. Empernando las bobinas de diferentes maneras, pueden hacerse corrientes de 2 ó 3 fases.

Naturalmente, la frecuencia de la corriente depende de la velocidad del rotor y no es constante. Por lo tanto la corriente es enviada a través de un rectificador.

5.3.1 Producción

Los generadores de imanes permanentes pueden comprarse como parte de una turbina.

Otra posibilidad es comprar un generador asíncrono. Estos generadores son usualmente hechos para funcionar a 1,500 r.p.m. Es posible eliminar el rotor estándar y reemplazarla por un centro de imanes permanentes, haciendo al generador más conveniente para funcionar a 50 – 500 r.p.m. En realidad en este procedimiento sólo el eje y el centro necesitan reemplazarse, los soportes estándar pueden usarse nuevamente. Sin embargo, toda la operación no es sencilla, y se requiere de herramientas sofisticadas.

5.3.2 Generadores asíncronos

Generadores asíncronos estándar funcionan a velocidades cercanas a la frecuencia de la red o múltiplos de ella. Para aerogeneradores grandes se utiliza frecuentemente 1,500 r.p.m. = 25 Hz (en los EE. UU., 1,800 r.p.m.). Estos generadores se caracterizan por el deslizamiento, que es la diferencia entre la velocidad del generador a potencia nominal y la frecuencia derivada de la red.

Un generador puede funcionar por ejemplo a 1,515 r.p.m. Entonces el deslizamiento es 1,515 – 1,500 = 15 r.p.m. Esto corresponde a 15/1,500 = 0.01 = 1% de deslizamiento. Por tanto los generadores asíncronos funcionan casi de manera sincrónica, lo que hace necesario que el rotor funcione a una velocidad específica (fija): el rotor no puede funcionar siempre a una eficiencia óptima.

Velocidad variable

Generadores de velocidad variable pueden funcionar eficientemente en un rango bastante amplio de velocidades (por ejemplo 1,200 - 1,800 r.p.m.). Esto se logra con unos circuitos electrónicos avanzados. Este tipo de generadores pueden combinarse con rectificadores y un inversor para obtener un voltaje y corriente sinusoidal de buen comportamiento.

5.4 Baterías

La función de las baterías (ver Figura 42) es de almacenar la energía eléctrica por períodos cuando no hay viento.

Es poco satisfactorio que no haya una buena manera de almacenar electricidad que es extraída del viento, a excepción de algunos casos (como el bombeo de agua). Con la electricidad la única manera es usando una batería. Lamentablemente, éste es un componente con propiedades que dejan mucho que desear.

Fuente: www.americanbattery.com

Figura 42: Batería

Una batería tiene corta vida. Mientras que un molino o panel solar pueden usarse por 10 – 20 años, la vida de una batería es generalmente 1,000 – 2,000 ciclos de carga/descarga. Si no hay ciclos de carga/descarga cada día, la batería dura aproximadamente 3 – 5 años.

Una batería es pesada. Mucho peso (plomo) se requiere para almacenar poca electricidad. Generalmente se requieren 4 – 6 kilos para almacenar 1 kWh. Y sólo la mitad de la capacidad 'oficial' puede usarse si no se quiere estropear la batería muy rápidamente.

Una batería tiene baja eficiencia. Sólo alrededor del 80% de lo que entre a la batería puede recuperarse. Ambas, la eficiencia de entrada y salida, son de alrededor del 90%.

Existen muchas sustancias tóxicas y peligrosas en la batería: Como el plomo, ácido sulfúrico, o, alternativamente, el cadmio. Si hay un corto circuito, la batería se recalienta y puede escaparse ácido sulfúrico.

Una batería requiere de mantenimiento: Regularmente casi todas las baterías deben recargarse con agua destilada.

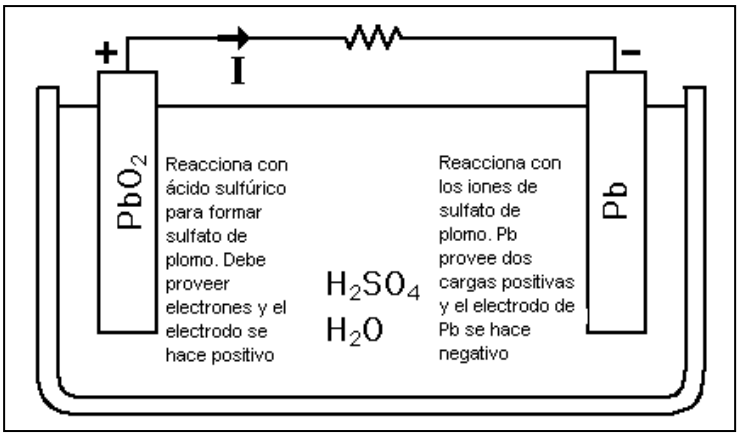
La cantidad de energía en una batería es difícil de determinar. La única manera de averiguar cuánta energía hay en una batería, es determinando la densidad del ácido que es un procedimiento bastante inexacto.

A pesar de todas estas desventajas las baterías son la única manera práctica de almacenar y transportar electricidad (si no hay red), por lo tanto estamos sujetas a ellas.

5.4.1 Principios de operación

Cualquier batería está hecha de un número de células conectadas en serie, por lo que sus voltajes suman un valor estándar, como 12 ó 24 V.

Una célula consta de dos electrodos (barras o planchas) con alguna sustancia química sobre ellos (por ejemplo, ácido sulfúrico). Entre los electrodos hay separadores. Durante la descarga hay una reacción química que genera electricidad, durante la carga esta reacción es invertida.


+
I
−
PbO_2
Reacciona con ácido sulfúrico para formar sulfato de plomo. Debe proveer electrones y el electrodo se hace positivo
H_2SO_4
H_2O
Reacciona con los iones de sulfato de plomo. Pb provee dos cargas positivas y el electrodo de Pb se hace negativo
Pb

Fuente: Elaboración propia

Figura 43: Reacción electroquímica

5.4.2 Características

Las baterías son una ciencia en sí mismas, y algunas personas han dedicado sus vidas al estudio de las baterías. Algunas expresiones utilizadas con relación a las baterías son explicadas a continuación para que pueda discutir con un vendedor de baterías o comentar al respecto en sus reuniones.

La primera cosa que se debe saber acerca de las baterías es su capacidad. La capacidad de una batería es la cantidad de energía que se le puede dar o recibir de ella. La unidad de carga es el amperio hora (Ah). Una batería con 80 Ah de capacidad puede (teóricamente) producir 8A durante 10 horas o 20 A durante 4 horas y así sucesivamente. Si es una batería es de 12 V, esto significa que la cantidad de energía es 12 x 10 x 8 = 960 Wh = 0.96 kWh.

El **estado de carga** es la cantidad de energía aún disponible en la batería. Si el estado de carga es de 30% en la batería arriba mencionada, entonces 0.3 x 0.96 kWh = 0.29 kWh están aún disponibles antes de que la batería se vacíe. En la práctica la máxima capacidad nunca puede utilizarse. Para la mayoría de las baterías es fatal vaciarlas completamente. En realidad las baterías de los carros no deben descargarse por más del 20 – 30 % (para que siempre haya un 70 – 80 % sobrante), y aún para baterías mejores las llamadas **descargas profundas** acortan su tiempo de vida.

La capacidad depende también del **grado de descarga**. A un grado bajo de descarga, puede usarse más energía de la batería que bajo un grado de descarga alto. El grado de descarga está designado como C; C/10 ó C_{10} significa que el grado de descarga es el grado que causa descarga completa en 10 horas.

Una secuencia de carga y descarga se llama **ciclo**. Un **ciclo profundo** significa que mucha energía ha sido liberada (digamos 70%). Un **ciclo superficial** significa lo opuesto.

La **vida de la batería** está definida como el número de ciclos después del cual la capacidad total cargada es sólo el 80% de lo que era al principio.

La **autodescarga** significa que la energía se pierde dentro de la batería, aún si no se le aplica carga alguna. La autodescarga es bastante rápida. Uno no debe sorprenderse si un porcentaje de la carga se pierde en un día.

La **sobrecarga** puede ocurrir cuando todo el material en la batería ha sido convertido a la forma de carga, la batería está 'llena'. Si la carga continúa pueden suceder diferentes reacciones químicas que producen oxígeno e hidrógeno. Esto se llama "gasificar". La gasificación lenta no es problema, es aún algo bueno ya que el líquido en la batería es mezclado.

Algunos diferentes tipos de baterías son:

- Batería sellada que es completamente cerrada. No hay riesgo de contacto con el otro y no requiere de reposición de agua.
- Batería seca (gelled battery), donde el líquido es convertido en una especie de gelatina, impidiendo que fluya.
- Batería ventilada que tiene una especie de tapa especial que puede abrirse por seguridad.
- Stand by (también en flotación) significa que la batería se mantiene cargada todo el tiempo. Sólo se utiliza en emergencias.

5.5 Componentes electrónicos

5.5.1 Controlador de voltaje

Un controlador de voltaje o regulador (ver Figura 44) es necesario para evitar la sobrecarga y descarga profunda de las baterías. El tipo más sencillo de controlador simplemente revisa si el voltaje sobre los terminales de la batería no está muy alto. Básicamente es un transistor de circuito sencillo. Si el voltaje límite es alcanzado, la carga se detendrá hasta que el voltaje de la batería haya descendido hasta un cierto límite, o la carga puede continuar a una proporción muy pequeña sólo para compensar la autodescarga.

Como el voltaje es temperatura dependiente, los controladores de voltaje suelen tener dispositivos para compensar temperatura.

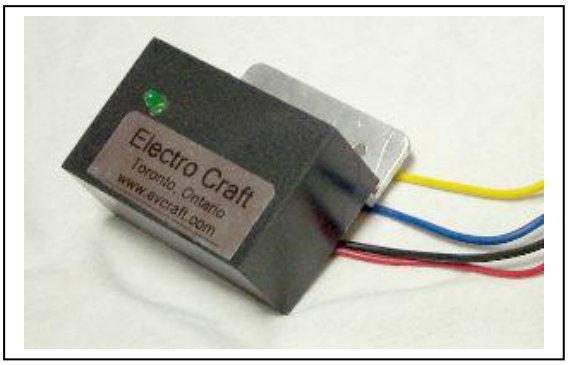


Figura 44: Controlador de voltaje

Los modelos más sofisticados también revisan si la batería no se ha descargado demasiado. Esto puede indicarse (por ejemplo con una luz) o la carga puede desconectarse.

Los controladores de estado sólido deben preferirse sobre los controladores con conmutadores de relay "antiguos" porque ofrecen mayor confiabilidad.

A menos que sea un experto en electrónica, no es recomendable construir controladores usted mismo. Mejores son los que puede comprar.

5.5.2 Inversor

Un inversor es un dispositivo que convierte la corriente continua (CC) a corriente alterna (CA). Se utilizan para artefactos que requieren CA (algunos artefactos o bombas de agua) o para hacer conexiones a una red CA (ver Figura 45).

Figura 45: Inversor

5.5.3 Balastro (dump load)

Un balastro se utiliza cuando la batería está llena y el viento sigue soplando. Como no es aconsejable tener el rotor funcionando sin carga, la energía debe ser enviada a algún lugar. Un balastro es simplemente un resistor (o transistor de potencia) que puede concebirse como un calentador eléctrico (ver Figura 46). En algunos casos es posible hacer corto circuito en el generador (lo que actuará como un freno).

Figura 46: Balastro (resistor grande)

5.5.4 Cables

Además de la confiabilidad el único criterio para escoger cables es la caída de voltaje. Debido a que los sistemas solares y eólicos a pequeña escala operan típicamente a bajos voltajes (12 ó 24V) los cables grandes se requieren para evitar grandes pérdidas de energía y caídas en el voltaje (si el voltaje cae mucho, los dispositivos no funcionarán más).

Incidentalmente, una mala conexión eléctrica en un sistema de bajo voltaje tiene el mismo efecto que el cable que es demasiado delgado: es una resistencia grande. Por tanto es una buena política revisar todas las conexiones meticulosamente.

Como regla general, una cantidad razonable de caída de voltaje es del orden del 5% del dispositivo de una batería. La caída del voltaje se calcula fácilmente con la Ley de Ohm:

$$\Delta U = I\,R = I\,\frac{\rho L}{A} \qquad (7)$$

Empleando la potencia eléctrica:

$$P = U\,I \qquad (8)$$

Se halla:

$$\Delta U = \frac{P}{U}\frac{\rho L}{A} \qquad (9)$$

Donde:

A	sección de cable [mm^2]
I	corriente [A]
L	largo de cable (¡suma desde y hasta el dispositivo!) [m]
P	potencia del dispositivo [W]
U	voltaje del sistema [V]
ΔU	caída de voltaje [V]
ρ	resistencia específica del cobre = 0.018 [Ωm]

Para hallar el tamaño de cable A (sección de cable), la fórmula puede rescribirse a:

$$A \geq \frac{\rho I L}{\Delta U} = \frac{\rho P L}{U \Delta U} \qquad (10)$$

De las fórmulas, puede verse que un sistema de 24 V es mejor que uno de 12 V porque hay menos voltaje con los mismos cables y por lo tanto menor pérdida de energía.

Ejemplo:

Tome una carga de 100 W a 15 m de las baterías en un sistema de 24 V. ¿Qué cable se necesita?

La caída de voltaje admisible está en 5% = 1.2V. Entonces, se busca la fórmula (7):

A = 0,02 x 100 x (2 x 15) / (24 x 1.2) = 2.1 mm^2

Supongamos que el cable está disponible en múltiplos de 1 mm^2, entonces deben utilizarse 3 mm^2. En un sistema de 12V, la caída de voltaje de 5% es 0.6V, que sería aceptable. Entonces la fórmula da:
A = 0.02 x 100 x (2 x 15) / (12 x 0.6) = 8.4 mm^2

¡ Note la gran diferencia !

5.6 Torre

Función

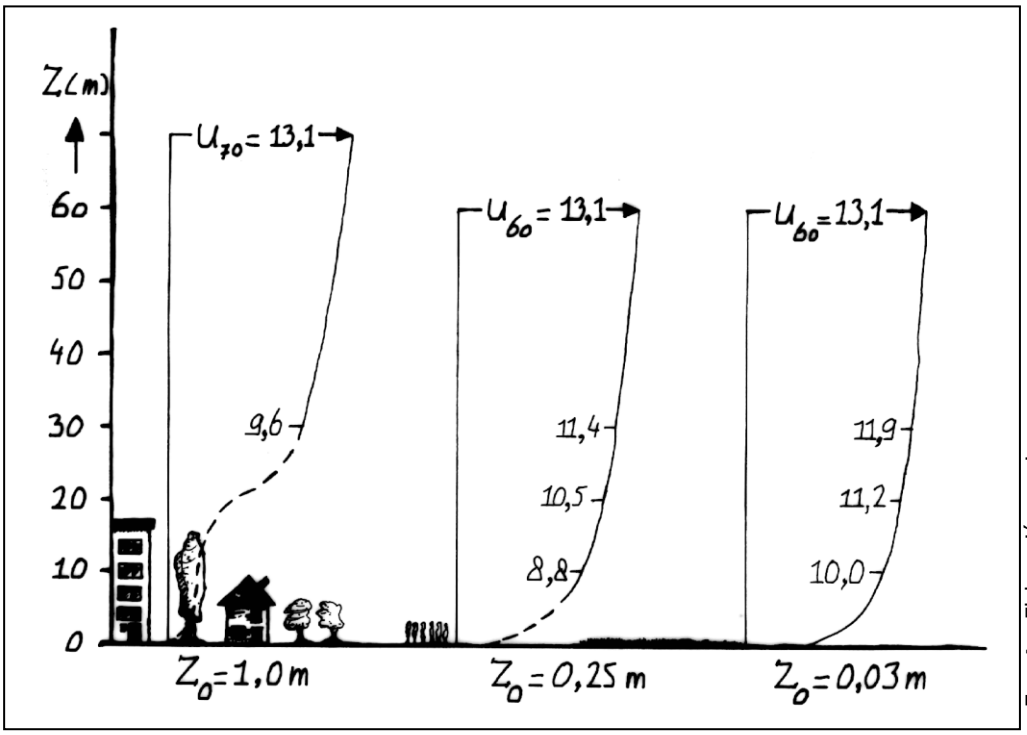
La función de la torre es llevar al rotor a una altura donde haya viento suficiente, es decir, por encima de los obstáculos cercanos. Se utilizan comúnmente tres tipos de torre:

- Torre tubular de acero
- Torre tubular de acero con tensores
- Torre estructural (con perfiles de acero)

Deslizamiento del viento

El viento siempre baja de velocidad cerca al nivel del suelo. Este fenómeno se llama deslizamiento de viento (ver Figura 47 y también el sub-capítulo 4.2) La figura muestra que el perfil del viento depende de la rugosidad del terreno z_o. A mayor rugosidad, más bajará la velocidad del viento, y la torre deberá estar a una mayor altura para que el rotor experimente la misma velocidad de viento.

Figura 47: Perfil vertical de la velocidad del viento



Fuente: Elaboración propia

Para calcular el aumento de la velocidad de viento con la altura, se puede usar la siguiente fórmula:

$$U_2 = U_1 \frac{\ln (h_2/z_0)}{\ln (h_1/z_0)} \qquad (11)$$

Donde:

h_2	altura (altura al eje del rotor) [m]
h_1	altura de referencia = altura donde se conoce la velocidad de viento [m]
$U(h_1)$	velocidad de viento a altura de referencia [m/s]
$U(h_2)$	velocidad de viento a altura (altura al eje del rotor) [m/s]
z_0	rugosidad del terreno

Restricciones

La fórmula sólo puede usarse en áreas donde no hayan colinas grandes u obstáculos en un rango de 1 – 2 Km. desde la turbina. La fórmula no debe usarse para alturas menores a 20 veces z_o. Por encima de vegetación continua (como un bosque) la línea "cero" debe tomarse a 0.5 – 0.7 veces la altura de la vegetación. La fórmula sólo es válida para velocidades de viento promedio.

Ejemplo:
¿Cuál es el efecto en un aerogenerador con 20 m de torre en lugar de una torre de 12 m si es usado en una campo abierto (z_o = 0.03 m)?

Se utiliza la fórmula (11) para hallar:

U_{20} = ln (20/0.03) / ln(12/0.03) U_{12} = 1.09 U_{12}

La velocidad del viento es 9% más alta. Esto podría a lo máximo significar 29% más de salida. Para un cálculo exacto, la nueva distribución de la velocidad de viento debe multiplicarse con la curva de potencia (ver capítulo "Diseño del sistema")

Obstáculos

Idealmente, no debería haber obstáculos cerca a un aerogenerador. Sin embargo, si los hubiese, ¿qué tan alta debería ser la torre? En la Figura Nº 47 de la página anterior, se pueden hallar las respuestas para algunos obstáculos.

5.6.1 Tipos de torre

Torre tubular

Una torre tubular consiste de tubos de acero, conectados rígidamente a la base, generalmente construida de un bloque de concreto (ver Figura 48)

Fuente: www.illinoiswindandsolar.com

Figura 48: Torre de hierro tubular

Ventajas

- La construcción es fácil de fabricar
- Prevención contra corrosión y pintura toman poco tiempo
- Los cables pueden colocarse dentro de la torre
- La torre puede construirse por partes que pueden unirse en el lugar elegido.

Desventajas

- Si el mismo tamaño de tubo es utilizado para toda la torre, el stress de doblez (fatiga) más alto se da cerca a la base. Este stress determina el tamaño de la torre, haciendo el resto de la misma innecesariamente pesada. Por lo tanto, las torres para aerogeneradores grandes se hacen siempre de forma cónica, tienen menor diámetro a medida que suben
- La carga de viento en la torre es alta

- Subir por la torre puede ser difícil
- Los tubos pueden ser costosos

Fuente: www.cecu.es

Torre tubular con tensores

Si la torre tubular está sujeta por tensores (tres o más) ya no tendrá que ser tan pesada porque los tensores toman fuerza. Sin embargo usar tirante requiere de bloques de concreto extra y más espacio. También los tensores generalmente deben revisarse para asegurarse de que no se hayan aflojado. Ver Figura 49.

Figura 49: Torre con tensores

Torre estructural

Una torre estructural consiste en perfiles de fierro o de palos tubulares conectados (ver Figura 50). Puede ser triangular o cuadrada.

Fuente: www.smallwindenergy.ca

Figura 50: Torre estructural

Ventajas

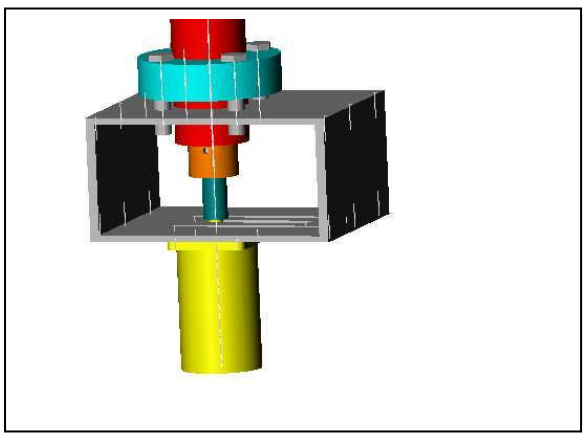
- ❑ Es fácil de fabricar
- ❑ Se requiere de pocos materiales (porque la torre puede tener la forma deseada)
- ❑ Puede ensamblarse en el lugar y es fácil de transportar
- ❑ Las cargas de viento en la torre pueden ser menores
- ❑ La torre puede escalarse fácilmente

Desventajas

- ❑ La construcción es una labor intensa, tanto para fabricarla como para ensamblarla
- ❑ Prevención de corrosión y pintado toman tiempo
- ❑ Se requiere de inspección continua de cerradura
- ❑ Los cables no pueden colocarse dentro.

5.7 Caja de engranajes

Una caja de engranajes es un componente muy delicado, y es difícil de fabricar. Es mejor evitarlas en cargadores de viento. Las cajas de engranajes se usan en aerogeneradores grandes, en esos casos siempre son fabricadas por firmas especializadas.



Fuente: www.me.dal.ca

Figura 51: Esquema de una caja de engranajes para sistemas eólicos

6. DISEÑO Y DIMENSIONAMIENTO DE UN SISTEMA EÓLICO

Este capítulo describe el diseño del sistema (Figura 52). Algunas pautas se darán para determinar qué tan grande debería ser toda la instalación y cómo pueden seleccionarse los componentes individuales.

La mejor estrategia es ir por los componentes probados que pueden comprarse, por tanto la tarea de diseñar componentes por uno mismo no se trata en este curso.

Los temas que se discutirán son:

- Cálculo de la demanda y el suministro de energía.
- Determinación del tamaño de cada componente.
- Qué debemos buscar cuando compramos algo.

Cuando se diseña un sistema eólico, es crucial conocer las cargas eléctricas y el recurso disponible.

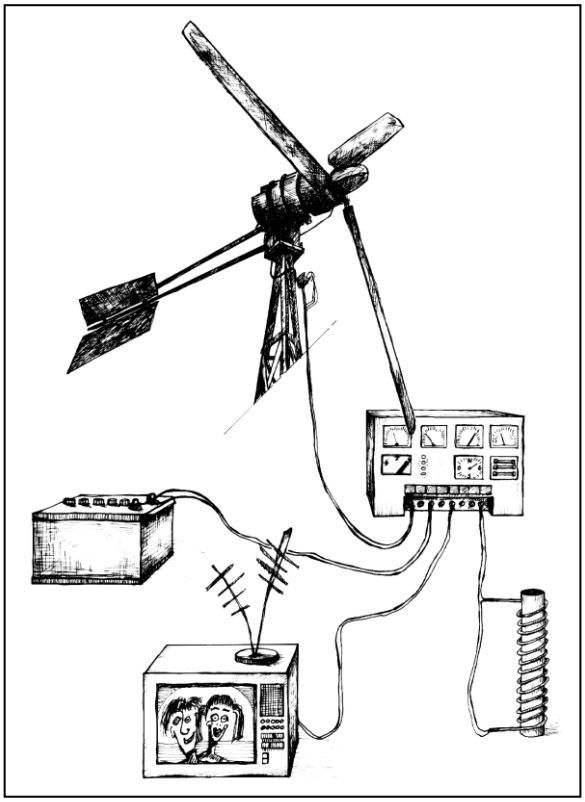


Figura 52: Sistema eólico

6.1 Demanda de energía

Lo primero que se debe hacer al diseñar un sistema es determinar cuáles son las demandas del usuario. Luego debe tomarse una decisión sobre qué sistema usar: Recuerde que es posible que otra opción energética sea una mejor alternativa, así que mantenga una mente abierta.

Estimar la demanda de electricidad significa determinar la máxima potencia que será utilizada, así como también la finalidad de su uso. Se deberá tomar en cuenta las variaciones diarias y mensuales, el margen de reserva para dar fiabilidad al sistema y el incremento de la demanda futura, cuando se estime el tamaño del sistema necesario.

Un sistema eólico puede ser acoplado a cualquier artefacto eléctrico. El Cuadro 9 muestra las potencias de los electrodomésticos más comunes y sus consumos mensuales. Este cuadro es de utilidad para estimar rápidamente los requerimientos energéticos de una pequeña instalación, con miras a dimensionar los sistemas de generación y baterías.

Es importante que se elijan los artefactos con la eficiencia más alta: La forma más económica de producir energía es ahorrándola. Por tanto, los tubos fluorescentes deben preferirse por encima de los focos de filamento (incandescentes), pues producen mucha más luz a la misma cantidad de energía. La electricidad debería preferentemente no usarse para calentar o para aire acondicionado.

Cuadro 9: Requerimiento típico de potencia de algunos artefactos

ARTEFACTO	POTENCIA (W)	CONSUMO MENSUAL (kWh)
Tubo fluorescente e inversor	12 – 40	1.44 – 4.8
Foco de filamento (incandescente)	25 – 100	3 – 12
Radio CD	12 – 30	1.44 – 3.6
Televisor pequeño blanco/negro	20	1.8
Televisor pequeño a color	50	4.5
Calculadora pequeña	10	0.2
Refrigerador	100 – 400	24 – 96
Horno microondas	1,000	7.5
Calentador eléctrico	1,500	3.75
Unidad de aire acondicionado	1,300	105
Secador de cabello	300	0.5
Secadora de ropa	4,800	80
Aspiradora	540	3
Cafetera	850	8
Plancha	1,050	11
Frigorífico	235	38
Congelador	330	30
Licuadora	290	1
Grill (parrilla)	1,050	2.5
Lavaplatos	1,200	28
Lavadora de ropa (automática)	375	5
Lavadora de ropa (manual)	280	4
Máquina de coser	75	1

El cuadro ofrece valores promedio. En lo posible utilice los datos marcados en los mismos artefactos.

6.2 Patrones de consumo de energía

Demanda promedio

Si los artefactos que se desean utilizar son conocidos, el consumo de energía puede hallarse. Es cuestión de multiplicar y sumar. Suponga que una radio tiene 10 W de potencia y funciona durante 5 horas, entonces el consumo de energía durante ese tiempo es 10 W por 5 horas = 50 Wh = 0.05 kWh. Vea el Cuadro **10** para algunos ejemplos.

Cuadro 10: Cálculo del consumo de energía para un día (ejemplo)

ARTEFACTO	POTENCIA (W)	TIEMPO (horas/día]	ENERGÍA (Wh/día)
Lámpara ahorrador comedor	8	4	32
Lámpara ahorrador cocina	8	2	16
Lámpara ahorradora lavandería	10	1	10
Lámpara ahorradora dormitorio	20	1	20
Pequeña TV a color	50	4	200
Radio CD	5	4	20
Refrigerador	100	12	1,200
TOTAL			***1,498***

Al funcionar, el refrigerador usará 100W, pero no funcionará todo el tiempo. El refrigerador tiene un termostato (interruptor de temperatura). Suponga que la temperatura máxima permitida es de 4 grados centígrados, entonces el termostato pondrá al refrigerador en acción cuando se alcancen los 4 grados. Para evitar el encendido sinfín, el refrigerador seguirá funcionando hasta que la temperatura alcance por ejemplo 1 grado centígrado. Entonces el termostato desconecta el refrigerador y la temperatura dentro de éste se eleva nuevamente, hasta que se alcance los 4 grados centígrados. Luego hay otro encendido, etc. Por lo tanto el refrigerador que está en "ON" todo el día, está estimado a funcionar sólo la mitad de este tiempo.

En el ejemplo, el requerimiento de energía es de 1498 Wh por día ≈ 1.5 kWh. Esto equivale a una potencia de consumo promedio de (dividir entre 24 h):

$$P = \frac{1498Wh}{24h} = 62W \qquad (1)$$

Observaciones

Calcular la demanda promedio es algo directo. Sin embargo, debe tomarse en cuenta de que si la electricidad está disponible, la demanda irá en aumento.

Para sistemas más grandes es posible separar la demanda en “esencial” y “no esencial”. Si las baterías están bajas, las cosas "no esenciales" pueden desconectarse automáticamente. Examinando con cuidado lo que realmente es necesario, pueden reducirse costos de inversión.

Patrón de demanda

Para establecer la cantidad de baterías requeridas, debe calcularse un patrón de demanda. Asumamos que todas las lámparas y la TV se usan por las tardes desde las 19:00 horas hasta las 23:00 horas. Todas juntas necesitan 300W en este tiempo. Si estos 300W se reparten durante 4 h obtenemos 300/4 = 75W de consumo promedio.

Dado que las noches son más frías que el día, el refrigerador funcionará durante el día más que en la noche. La potencia promedio durante el día es de 50W. Para simplificar las cosas asumamos que desde las 08:00 hasta las 20:00 horas la potencia promedio es de 75W y que desde las 02:00 hasta las 08:00 horas 25W.

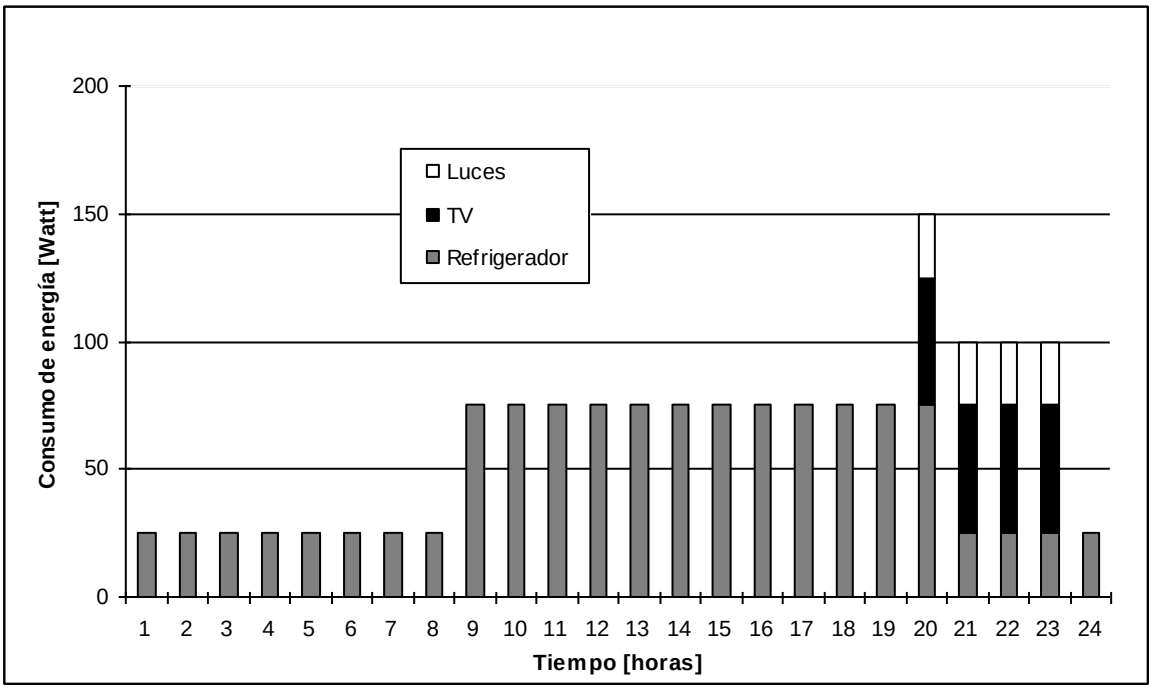
Finalmente, el patrón de demanda se ve como en el Cuadro 11. Note que los artefactos pequeños han sido agrupados por simplicidad; el margen de error en los cálculos de demanda y suministro es tan grande que no tiene caso incluir todos los detalles.

Cuadro 11: Patrón de consumo de energía para un día (ejemplo)

TIEMPO (Horas)	ARTEFACTOS	POTENCIA (W)	ENERGÍA (Wh)
0 - 8	Refrigerador (bajo)	25	200
8 - 19	Refrigerador (alto)	75	825
19 - 20	Refrigerador (alto) luces, TV, radio CD	150	150
20 - 23	Refrigerado (bajo) luces, TV, radio CD	100	300
23 - 0	Refrigerador (bajo)	25	25
		Promedio = 62	**1500**

Es conveniente hacer un gráfico de esto (ver la Figura 53)

Figura 53: Gráfico de la demanda de energía



Fuente: Elaboración propia

6.3 Suministro de energía

Cuando la demanda promedio de energía se conoce así como la velocidad promedio del viento, el tamaño del aerogenerador que se requiere puede calcularse.

6.3.1 Cálculo sencillo de la salida (producto de salida)

Un primer cálculo de suministro de energía puede hacerse usando la siguiente regla:

$$P = e \times A \times V^3 \qquad (2)$$

Donde:

A	área barrida por el rotor = $\pi R2 = \pi/4\ D2$
e	factor de energía, generalmente 0.15...0.30.
P	potencia promedio disponible (suministro) [W]
V	velocidad de viento promedio [m/s]

Dependiendo del periodo considerado, la velocidad promedio de viento puede ser un promedio mensual o anual.

Si el promedio de demanda de potencia P_D se conoce, el diámetro del rotor D puede calcularse reescribiendo la fórmula anterior. Si el promedio de demanda PD es tomado para igualar el promedio de suministro PS, entonces (con e = 0.20):

$$D = 2.5 \times \sqrt{\frac{P_D}{V^3}} \qquad (3)$$

Ejemplo:

Suponga que la demanda promedio es de 62 W (calculado en el Cuadro 11) y que el mes con la menor velocidad de viento tiene un promedio de velocidad de viento de 4 m/s. Entonces diámetro del rotor que se requiere, se calcula en:

$$D = 2.5\sqrt{\frac{62}{4^3}} = 2.5\text{m}$$

Note que la regla sólo es para dar una idea global de que si la energía eólica es factible, y no para cálculos exactos. Por ahora se ha seleccionado un aerogenerador con un rotor de diámetro de D = 2.5 m. Vea más adelante cómo hacer cálculos más exactos.

6.3.2 Cálculo más exacto de la salida

Utilizando los estimados del fabricante

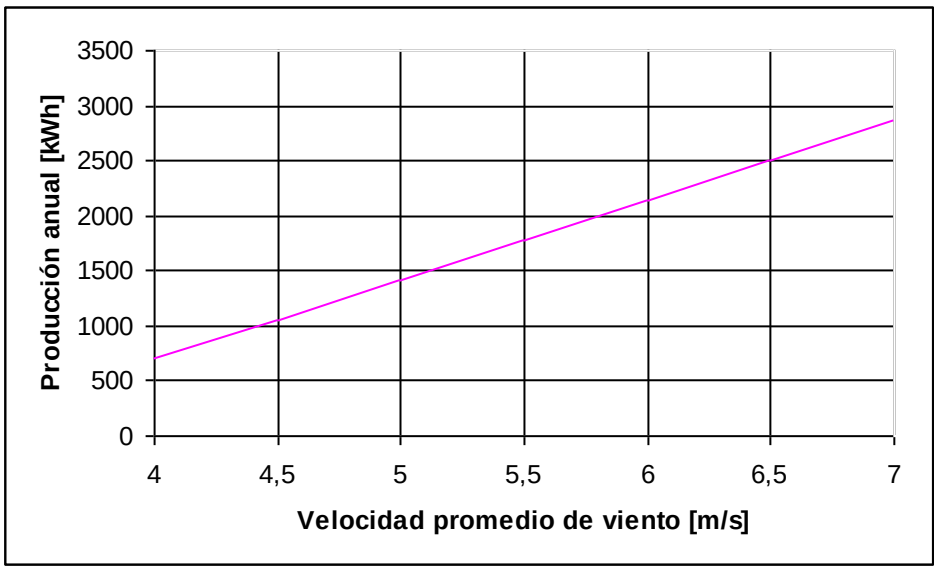
A veces el fabricante ofrece un estimado de la salida (producto de salida) como una función de la velocidad promedio del viento. Esto puede presentarse en un cuadro (ver Cuadro 12) o en un gráfico (ver Figura 54). Con estos datos siempre debería determinarse a qué altura se hicieron las mediciones de la velocidad del viento.

Cuadro 12: Ejemplo de los datos de salida de un fabricante en función de la velocidad del viento

Velocidad promedio del viento [m/s]	4	5	6	7
Output anual [kWh]	600	1300	2100	2900
Output mensual [kWh]	50	108	175	242
Output mensual promedio [W]	71	148	241	331

Fuente: Elaboración propia. Output = salida, producción de energía
Nota: Velocidad del viento a la altura del cubo, rotor del diámetro = 2.5 m.

Figura 54: Estimación de la producción de electricidad de un fabricante



Fuente: Elaboración propia

Ejemplo:

En un mes crítico, la velocidad del viento es de 4.2 m/s, la salida mensual puede ser calculada por interpolación entre 4 y 5 m/s en 62 kWh (energía) ú 86 W (potencia).

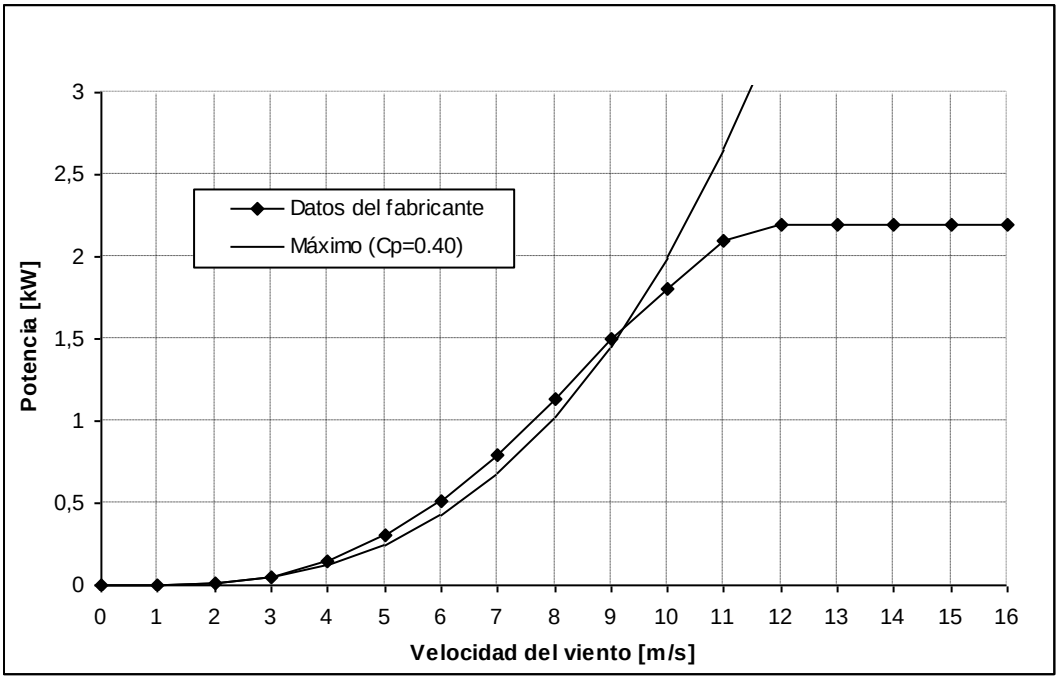
Utilizando la distribución de la velocidad del viento y la curva de la potencia

Los resultados más exactos pueden hallarse combinando las mediciones de la distribución de la velocidad de viento y las mediciones de la curva de la potencia de un aerogenerador.

En el capítulo titulado "El viento: Recurso energético" (ver Capítulo 4 del Manual) se describe cómo hallar la mejor distribución de la velocidad del viento (el mejor cálculo). Más aún, debe conocerse la curva de la potencia de un aerogenerador en función de la velocidad de viento **(Curva P-V)**, que nos da la potencia calculada para cada velocidad de viento. Vea la Figura 55 para un ejemplo. Esta curva puede obtenerse del fabricante del aerogenerador. Si una curva P-V va a usarse, se debe conocer:

- A qué altura fue medida la velocidad del viento.
- Cuál fue la densidad del aire (o temperatura y presión)
- Qué unidades se usaron (por ejemplo: millas por hora, metros por segundo)

Figura 55: Ejemplo de una curva de potencia y potencia máxima (Proven Wind Turbines, WT 2500)



Fuente: http://www.provenenergy.co.uk

Es buena idea comparar la curva P-V con el máximo producto de salida (output) posible, dado por:

$$P_{max}(V) = C_{p,max}(\frac{\rho}{2})(\frac{\pi}{4})D^2V^3 \qquad (4)$$

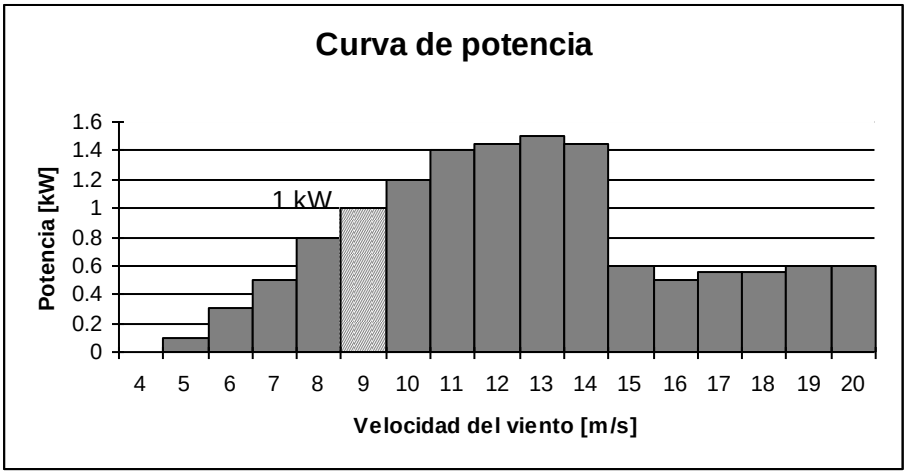
Donde:

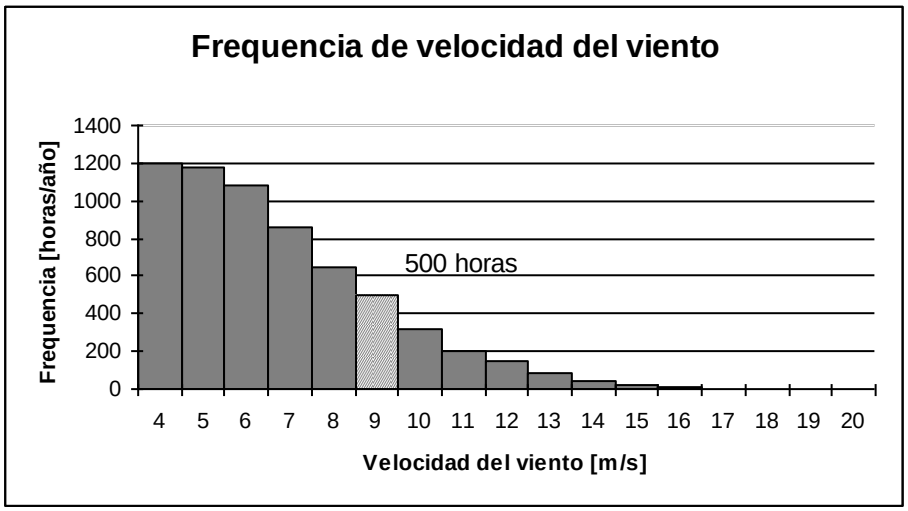
$CP_{,max}$	coeficiente de potencia máximo, razonable para turbinas pequeñas: $CP_{,max}$= 0.40
D	diámetro del rotor [m]
P_{max}	potencia máxima [W]
V	velocidad de viento [m/s]
ρ	densidad del aire [kg/m^3]

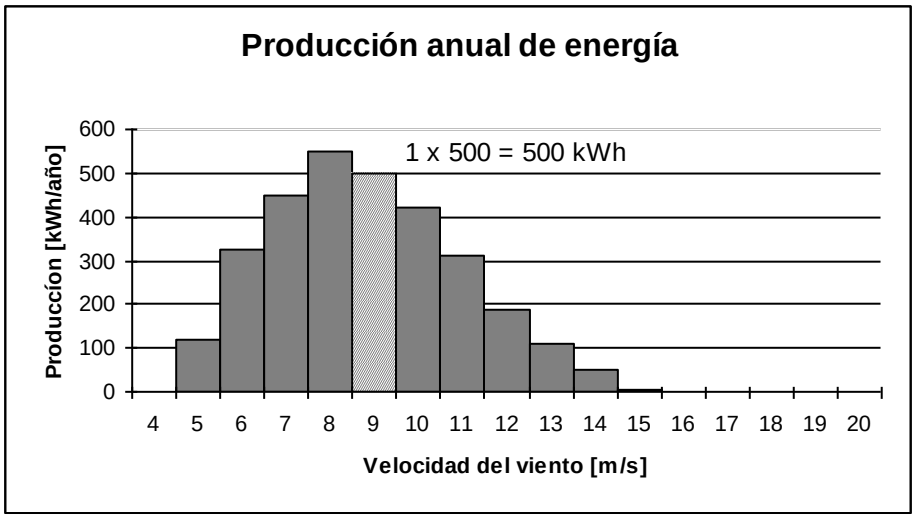
Si la curva del fabricante está muy por encima de la línea de potencia máxima, la curva P-V puede estar errada. Si no se dispone de mejores datos, por lo menos corrija la curva de potencia dada hacia abajo a la potencia máxima posible. Vea la Figura 55 como ejemplo.

Ahora supongamos que tanto la distribución de la velocidad de viento y una buena curva de potencia se conocen. Entonces el total anual (o mensual, si se considera un mes) de producto de salida (output) se halla multiplicando el número de horas de viento con una velocidad específica por la salida esperada a esa velocidad (vea la Figura 56)

Figuras 56: Cálculo de la producción de electricidad







Ejemplo **(ver Figuras 56)**

Para cierto aerogenerador, la curva de potencia indica que la potencia de 35 W debe esperarse a una velocidad de viento de 5 m/s. Durante el 11% del tiempo el viento está entre 4.5 y 5.5 m/s. ¿Cuál es la salida (output, energía producida) para este intervalo de velocidad de viento?

Respuesta: El tiempo total es 0.11 x 365 x 24 = 964 horas
La salida es de 35 W.

Entonces la energía producida es: E = 35 x 964 = 33 740 Wh = 33.74 kWh

Repitiendo el procedimiento para cada intervalo de velocidad de viento se puede hallar el output total anual.

6.4 Estimar los datos de velocidad de viento

La evaluación del recurso viento es importante para un proyecto exitoso. Pequeñas diferencias en la velocidad del viento pueden significar grandes diferencias en la salida o producción de energía. Se necesita tomar cuidadosamente en consideración la influencia de los obstáculos y los patrones estacionales del viento, cuando se mide la velocidad del viento y se diseña un proyecto eólico.

Los mejores datos que se pueden tener son los datos de viento del lugar de instalación previsto. Nada puede ser mejor que eso. Sin embargo, en muchos casos éstos no están disponibles y debemos utilizar datos que tenemos. La información disponible de viento de fuentes meteorológicas locales se obtienen frecuentemente de aeropuertos o zonas urbanas protegidas, las cuales subestiman el potencial de viento por un largo margen. Para proyectos a gran escala, es prudente realizar mediciones de viento. Para proyectos pequeños, las mediciones propias no son económicamente justificables.

Si se cumplen los siguientes requerimientos, los datos de una estación meteorológica pueden utilizarse:

- Los datos de la estación deben ser confiables.

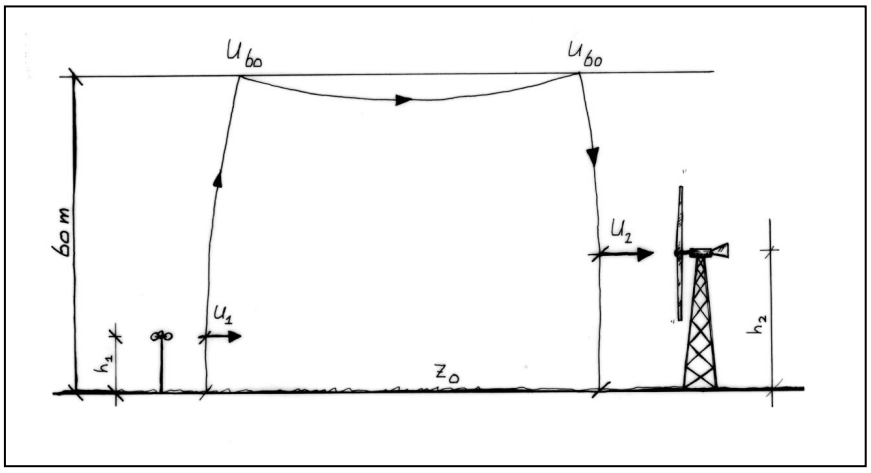
- La estación no debe estar muy alejada, digamos dentro de los 100 km.
- Entre la estación y el lugar de instalación del equipo, debe haber un terreno plano ininterrumpido y homogéneo.

Esto significa que en un área montañosa, los datos que no son del lugar mismo son virtualmente inservibles. En estos casos deben obtenerse datos locales primero.

Transformación de la velocidad del viento

Si se cumplen con ciertos requerimientos, (ver ítem anterior) es posible estimar la velocidad del viento en el lugar con un procedimiento de dos pasos (Figura 57). Esto ya fue discutido en el capítulo "El viento: Recurso energético" del Capítulo 4 del manual.

Figura 57: Cálculo de la velocidad del viento en el sitio del molino (Transformación hacia arriba y hacia abajo)



1. Halle la velocidad del viento a 60 m de altura a partir de la velocidad de viento en la estación meteorológica.
2. Halle la velocidad del viento en el lugar de la velocidad del viento a 60 m.

Las fórmulas eran, para la transformación hacia arriba:

$$U_{60} = U_{ha} \frac{\ln\left(\frac{60}{z_{oa}}\right)}{\ln\left(\frac{h_a}{z_{oa}}\right)} \qquad (5)$$

Y para la transformación hacia abajo:

$$U_{Hs} = U_{60} \frac{\ln\left(\frac{H}{z_{os}}\right)}{\ln\left(\frac{60}{z_{os}}\right)} \qquad (6)$$

Combinando ambas transformaciones (4.5) y (4.6) arroja:

$$U_{HS} = \frac{\ln\left(\frac{H}{z_{os}}\right)}{\ln\left(\frac{60}{z_{os}}\right)} \times \frac{\ln\left(\frac{60}{z_{oa}}\right)}{\ln\left(\frac{h}{z_{oa}}\right)} \times U_{ha} \qquad (7)$$

Donde:

h	altura de anemómetro [m]
H	altura del cubo del rotor [m]
Z_{oa}	rugosidad de terreno en ubicación del anemómetro [m]
Z_{os}	rugosidad de terreno en ubicación del aerogenerador.
U_{ha}	velocidad de viento medida por anemómetro [m/s]
U_{HS}	velocidad de viento en el lugar a altura del cubo [m/s]

Note que esta transformación debe realizarse separadamente para cada sector de 30 o 45 grados.

Ejemplo:

Suponga que la velocidad del viento es medida en una estación meteorológica a 100 km del lugar (un aeropuerto). Los datos de velocidad del viento para el aeropuerto indican un promedio de velocidad del viento de 4.5 m/s. La rugosidad en el aeropuerto es z_o = 0.03 (en todas direcciones) y la altura medida es de 18 m.

En el lugar proyectado para ubicar la turbina, la rugosidad es de z_o = 0.10 m. Por el momento la altura de la turbina está calculada en 10 m. Cuál es la velocidad promedio del viento en el lugar de ubicación de la turbina?

Respuesta: La respuesta se halla en la transformación de la velocidad del viento del aeropuerto hasta 60 m de altitud y luego bajar a 10 m en el lugar de ubicación de la turbina. La velocidad del viento a 60 m de altitud es:

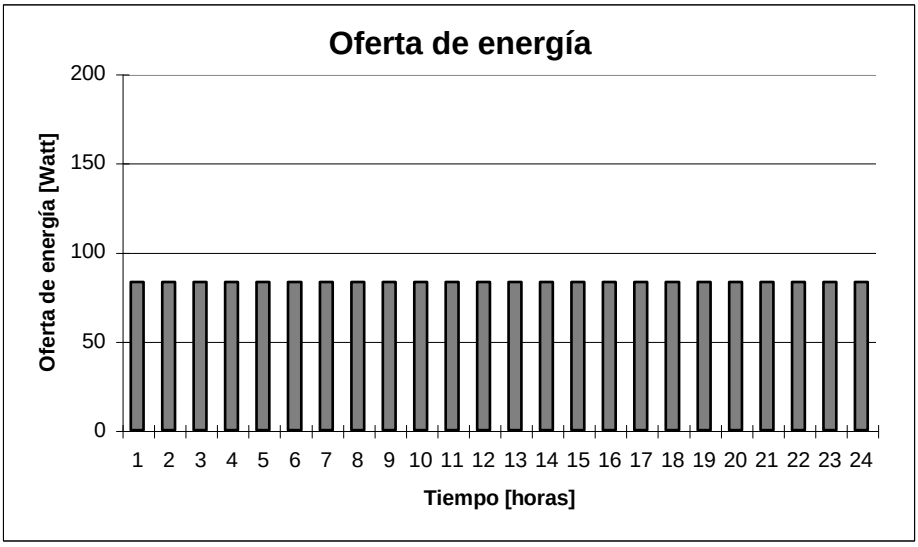
U_{60} = U_{ha} 1n(60/0.03) / 1n(18/0.03) = 4.5 x 1.19 = 5.35 m/s.

Por tanto la velocidad del viento en el lugar de ubicación de la turbina es:

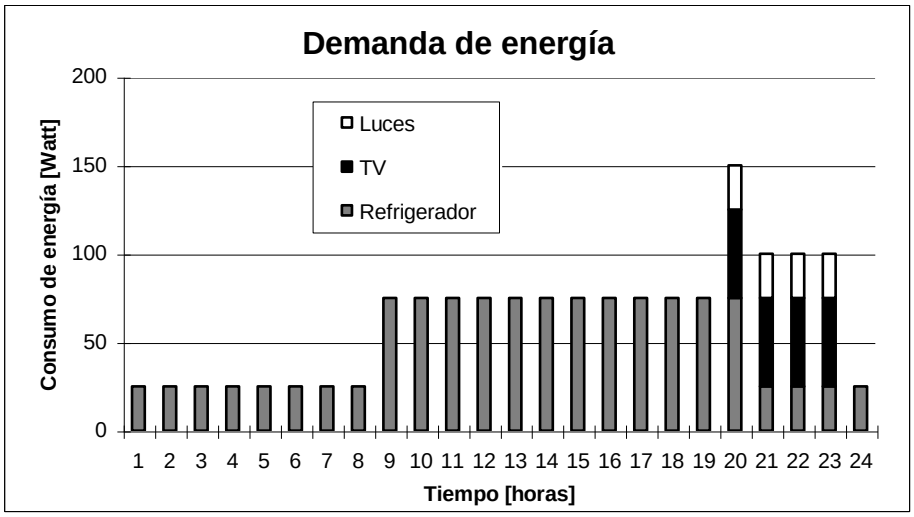
U_{HS} = U_{60} 1n(10/0.1) / 1n(60/0.1) = 5.36 x 0.72 x 3.85 m/s

Vea la Figura 58 para una representación gráfica de la transformación. Si el total de la energía de salida se ha hallado, una corrección para densidades de aire diferentes debe realizarse para obtener una respuesta final.

Figura 58: Comportamiento del sistema si hay viento constante: Demanda y oferta



Fuente: Elaboración propia



Fuente: Elaboración propia

Cálculos con un programa de computadora

Todo el cálculo es básicamente una repetición de cálculos sencillos, todo se hace mejor en una hoja de cálculo. El resultado de tal hoja de cálculo se da en el siguiente cuadro:

Cuadro 13: Cálculo de salida de un aerogenerador

CALCULOS DE SALIDA DE UN GENERADOR

Entradas

Velocidad promedio del viento	4.5 m/s
Altura del anemómetro	18 m
Rugosidad del terreno en el lugar del anemómetro	0.03 m
Altura de núcleo del rotor del generador	10 m
Rugosidad del terreno en el lugar del WT	0.1 m

Densidad de la curva	1.225 kg/m3		
Altitud	1000 m		
Temperatura	8.5 C	Hint:	8.5
Presión	89619 Pa	Hint:	89619
Diámetro del rotor	2.5 m		

Salidas

Densidad del aire en el lugar de la turbina	1.109 kg/m3
Factor de corrección de potencia	0.9
Velocidad promedio del viento en el lugar de la turbina	3.85 m/s

Salida de energía anual	730 kWh
Potencia promedio	83 W
Factor de energía	0.30 -

Uavg (m/s)	U1 (m/s)	U2 (m/s)	P(U) (W)	Prob (-)	Tiempo (hr)	Energía (kWh)
-	0	0.5	-	0.013	115	-
1	0.5	1.5	0	0.099	870	0
2	1.5	2.5	0	0.170	1486	0
3	2.5	3.5	10	0.196	1714	17
4	3.5	4.5	45	0.181	1582	71
5	4.5	5.5	120	0.141	1232	148
6	5.5	6.5	200	0.095	829	166
7	6.5	7.5	270	0.056	489	132
8	7.5	8.5	370	0.029	254	94
9	8.5	9.5	470	0.013	117	55
10	9.5	10.5	580	0.005	48	28
11	10.5	11.5	700	0.002	17	12
12	11.5	12.5	780	0.001	6	4
13	12.5	13.5	860	0.000	2	1
14	13.5	14.5	940	0.000	0	0
15	14.5	15.5	980	0.000	0	0
16	15.5	16.5	1000	0.000	0	0
TOTAL				**1.000**	**8760**	**729**

El promedio de salida de la turbina es 83 W. Esto es más que los 62 W requerido en el ejemplo. Sin embargo, mucha de la electricidad no es utilizada directamente sino más bien almacenada en la batería primero; hay considerables pérdidas dado que la eficiencia de una batería es sólo de 80% más o menos (90% para carga y 90% para descarga). Suponga que la mitad de la electricidad es utilizada

directamente de la turbina y la otra mitad es almacenada primero. El promedio de salida debe corregirse a:

P = 83/2 + 83/2 x 0.80 = 75 W

Altura de la torre

Usando la hoja de cálculo es fácil hallar cuál es la influencia de una altura diferente en la torre en la energía de salida. Simplemente cambie la altura de la torre y el cálculo se rehace automáticamente. La energía de salida extra puede pesarse contra el costo extra que implica hacer una torre más grande.

6.4.1 Resumen

Los pasos que pueden seguirse para llegar a calcular una salida (producción de energía) estimada, se detallan a continuación:

1. Haga un cálculo grosso modo con la regla de tres.

Si el resultado es prometedor, se necesita realizar un cálculo mejor. Hay dos posibilidades. La primera es:

2. Utilice los datos de salida del fabricante.

La segunda y mejor es:

3. Utilice una curva P-V ya medida y revisada.

En lo que concierne a los datos, lo mejor es:

A. Tome los datos en el mismo lugar.

Las alternativas son:

B. Cálculos en el lugar (por ejemplo, de vegetación)
C Cálculos de una estación.

6.5 Almacenamiento

6.5.1 Consideraciones generales

Utilizando el consumo de energía promedio y los datos de viento requeridos, se puede establecer el tamaño de la turbina. Ahora necesitamos determinar el tamaño del banco de baterías.

El mejor almacenamiento es el almacenamiento cero

Lo mejor que se puede hacer es evitar un almacenamiento de electricidad en su conjunto. Lamentablemente, no hay muchos casos en los que esto es posible. El caso del bombeo de agua es uno de ellos, ya que el agua puede almacenarse en lugar de la electricidad.

Otra posibilidad de almacenamiento es una red. Pero no es muy económico acoplar pequeños aerogeneradores o paneles solares a una red, porque no recibe una compensación económica suficiente por la electricidad que se produce en forma privada.

Si el almacenamiento es absolutamente necesario, entonces debe calcularse el tamaño necesario.

Cálculos sencillos

Si observamos el viento, será raro encontrar un lugar donde el suministro de energía sea el mismo todos los días. En muchos de los casos, el viento fluctuará todo el tiempo. Debemos trabajar con probabilidades. La probabilidad de que haya energía disponible durante un largo periodo de almacenamiento es de 1 (seguro) (por ejemplo, suficientemente grande como para un mes sin vientos), y cero si no hay almacenamiento. Debemos hacer una elección en algún punto intermedio.

El criterio para dicha elección se basa en aceptar la posibilidad de que no hay energía disponible. Suponga que un día al año sin energía es aceptable. Debemos inspeccionar los datos climatológicos de algunos años y descubrir cuánto duran los periodos prolongados sin viento (definir "sin viento" por ejemplo como U < 2 m/s). Ver Cuadro 14 para un ejemplo.

Cuadro 14: Periodos sin viento (ejemplo)

Duración del periodo sin viento [días]	1	2	3	4	5	15
Número de periodos al año	15	6	4	2	1	1

La demanda de un día sin electricidad se da por hecho, la capacidad debe ser suficiente para 15 días (este es probablemente un mes sin viento que se da cada año). Ya que esto es muy costoso, se puede convencer al usuario de establecer entre 4 y 5 días de almacenamiento.

Métodos avanzados

Si están disponibles datos representativos del clima (no datos promedios) es posible predecir el comportamiento de todo el sistema en un año (por ejemplo, incluyendo las pérdidas de energía cuando no hay viento pero la batería ya está llena). Entonces, es sólo cuestión de elegir la mejor capacidad de batería y ver qué sucede en los cálculos y cuántos días no tendremos electricidad.

El principio de dichos cálculos no es muy complicado, sólo que hay tantos detalles en que pensar que solamente podría hacerse con un programa computarizado.

Demandas de energía y viento bien definidas

Si Ud. conoce en detalle la demanda de energía y del viento, entonces podrá hacer algunos cálculos a mano. Por ejemplo, un aparato de telecomunicaciones en zonas costeras. En este caso, tanto la demanda como el suministro de energía (el viento casi siempre sopla en las zonas costeras) son casi constantes. Otro ejemplo es un poste de luz en la calle: sólo hay demanda de energía por las noches. Si se trata de un faro solar, entonces el suministro de energía es sólo de día.

Asumiendo dichos datos como constantes, podemos aplicar los siguientes principios de cálculos.

6.5.2 Cálculos con el patrón de consumo de energía diario

Viento promedio durante el día

Para hacer el cálculo manejable, asuma que la entrada de energía del viento es constante (en el mes crítico) a un nivel promedio = 83 W; en una hora, la turbina generará 83 Wh. Luego, deberá investigarse el comportamiento de la instalación a lo largo de un día.

El uso promedio de energía es de 62 W, menor que 83 W, por lo tanto la batería probablemente esté llena al comenzar del día. Sin embargo, debemos revisar todas las posibilidades. Tomemos una batería de 1,000 Wh (capacidad nominal). Esto corresponde a 83 Ah a 12 V.

Vea el Cuadro 15. Durante la noche, desde las 00:00 hasta las 08:00 horas, el suministro de energía de la turbina es 8 x 83 = 664 Wh. La demanda de energía es de 8 x 25 = 200 Wh. Esto significa un sobre valor de 664 - 200 = 464 Wh.

Esta cantidad se coloca en la batería pero sólo con una eficiencia del 90%. Por lo tanto, la energía en la batería aumenta con 0.90 x 464 = 418 Wh. Entonces, si empezamos con 100 Wh en la batería, la carga se eleva a 618 Wh. Sin embargo, si empezamos con 800 Wh en la batería, sólo podemos poner 200 Wh más, y 218 Wh se pierden.

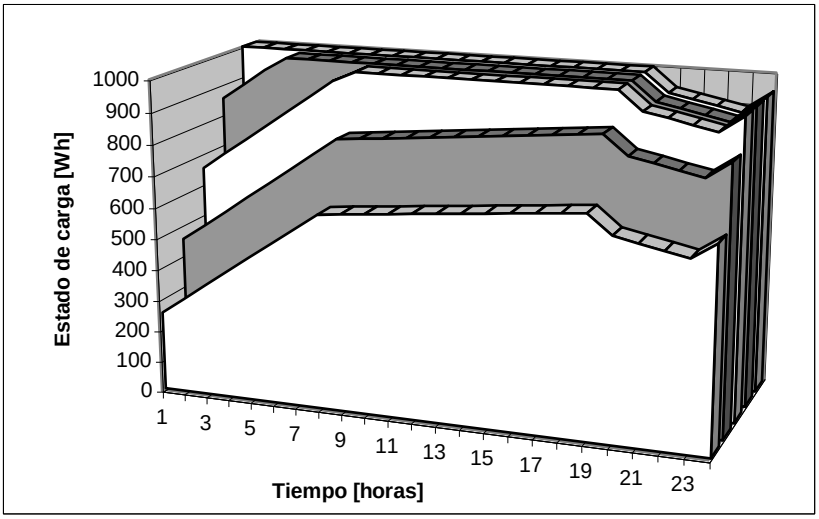
La batería no puede llenarse más allá del máximo (1,000 Wh), y no es posible obtener más de 800 Wh de ella, resultando en un nivel de 200 Wh = 20%.

Cuadro 15: Comportamiento del sistema con suministro de energía continuo

Tiempo [h]	Suministro de energía [Wh]	Demanda de energía [Wh]	Disponible [Wh]	Cambio en carga de batería [Wh]	Estado de carga en t=0 h [Wh]				
					200	400	600	800	1000
0-8	664	200	+464	+418	618	818	1000*	1000*	1000*
8-19	913	825	+88	79	697	897	1000*	1000*	1000*
19-20	83	150	-67	-74	623	823	926	926	926
20-23	249	300	-51	-57	566	766	869	869	869
23- 0	83	25	+58	52	618	818	921	921	921
	1992	1500	492	Profundidad del ciclo	418	418	400	200	131

* Nivel máximo de carga.
Nota: Eficiencia de carga y descarga de la batería: 90%. Vea también la Figura 59.

Figura 59: Comportamiento del sistema si hay viento constante: Estado de carga de la batería



Fuente: Elaboración propia

En la mayoría de estos ciclos, el nivel al final del día no es el mismo que al comienzo (vea la Figura 59)

Ya que en promedio, el aerogenerador produce más de lo requerido, lo más probable es que la batería esté llena al comienzo del día. Esto derivará en un ciclo superficial. Por ejemplo, si la batería está 100% cargada, el cambio en la carga sólo será de 200 Wh = 20% (ver Cuadro). En realidad, la batería de 300 Wh (50 Ah a 12 V) sería suficiente, resultando un patrón de ciclo:

300 - 300 - 300 - 226 - 169 - 221 – 300, etc.

Una situación completamente diferente ocurre si el viento sopla, por ejemplo, sólo durante el día desde las 8 a 20 h (ver el Cuadro 16 y las Figuras 60). Si el estado de carga de la batería es menor que 422 Wh, entonces el nivel de carga baja a 20% de su capacidad total o menos (que es el nivel de carga más bajo posible en una batería, algo que debería evitarse).

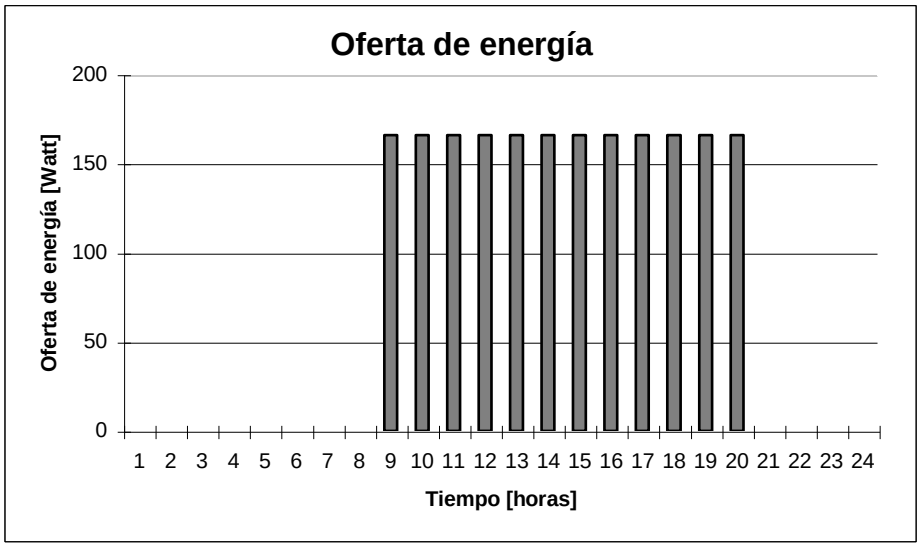
Cuadro 16: Comportamiento del sistema con suministro de energía eólica sólo durante el día. Eficiencia de carga y descarga de batería de 90%

Tiempo [h]	Suministro Energía [Wh]	Demanda de energía [Wh]	Disponible [Wh]	Cambio en carga de batería [Wh]	Estado de carga en t=0 h [Wh]				
					200	400	600	800	1000
0-8	0	200	-200	-222	200	200	378	578	778
8-19	1826	825	+1001	900	1000	1000	1000	1000	1000
19-20	166	150	+16	14	1000	1000	1000	1000	1000
20-23	0	300	-300	-333	667	667	667	667	667
23- 0	0	25	-25	-28	639	639	639	639	639
				Profundidad del ciclo	800	800	622	422	361

* Nivel máximo de carga.
Nota: Eficiencia de carga y descarga de la batería: 90%. Vea también la Figura 59.

Puede verse que cualquiera que sea el estado de carga al comienzo del día, el nivel al final es 639 Wh. Por lo tanto, una profundidad de ciclo de más o menos 600 Wh debe tomarse en cuenta (ver la columna de 600 Wh) y una batería de 100 Wh es definitivamente necesaria.

Figuras 60: Oferta y demanda si hay viento solamente durante el día



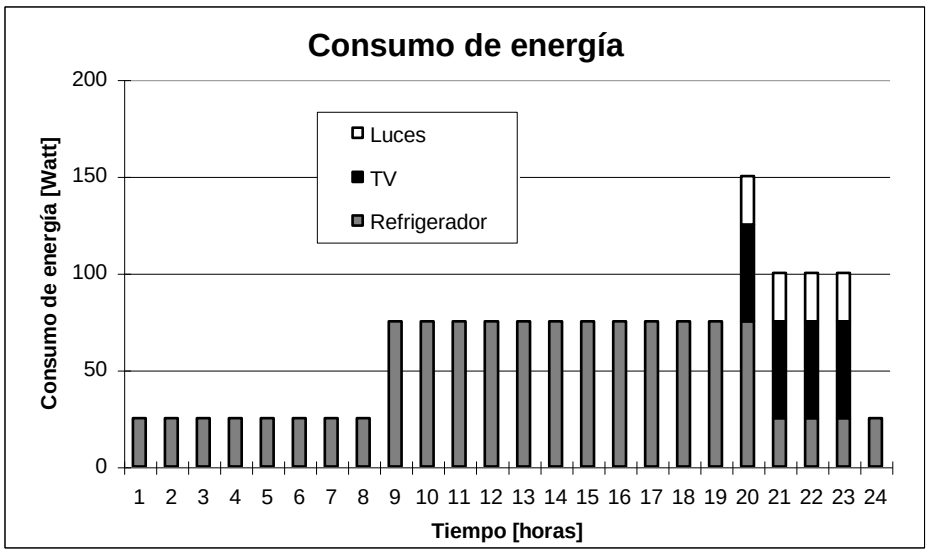
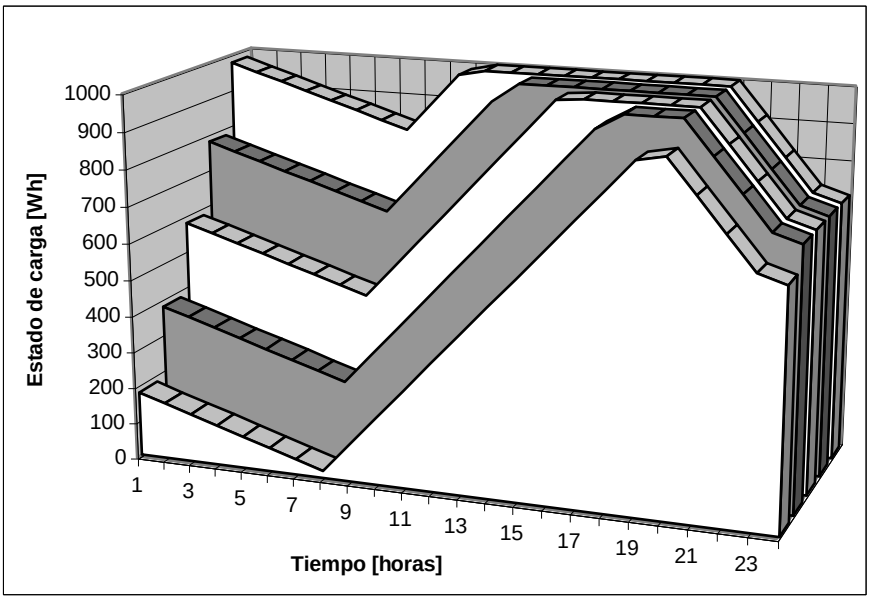


Figura 61: Comportamiento del sistema si hay viento solamente durante el día. Estado de carga de la batería



Fuente: Elaboración propia

Conclusión

Aún con este sencillo ejemplo, queda claro que el patrón de suministro de energía eólica es bastante importante para determinar el tamaño de la batería requerida. Si estos datos no están disponibles, no tiene sentido realizar cálculos detallados y el tamaño sólo podrá estimarse.

6.6 ¿Cómo se selecciona un aerogenerador? Recomendaciones

Además del potencial de viento y del uso planeado, el tamaño y tipo del equipo afecta grandemente la producción de energía. El área de barrido del rotor está en función al cuadrado de la longitud del álabe (el radio del área de barrido del rotor). Un aumento modesto en la longitud del álabe eleva la producción de energía y la costo-eficiencia.

Cada aerogenerador es diferente, a pesar de que aparentemente poseen similares índices de energía. Algunas máquinas están diseñadas para operar más eficientemente a bajas velocidades de viento, mientras otras están previstas para regímenes de viento más altos.

6.6.1 Funcionamiento

El funcionamiento de la máquina es muy importante, en particular la curva de potencia - velocidad. *Sin embargo recuerde que la confiabilidad de la máquina es aún más importante.* El proveedor debe ser capaz de ofrecerle la curva P - V de su aerogenerador (de no ser así, diríjase a otro).

La curva P-V, junto con los datos del viento (después de que se hayan hecho todas las correcciones), puede utilizarse para proyectar la salida del sistema del aerogenerador.

Optimismo en los estimados de producto de salida

Lamentablemente, no todas las curvas P-V pueden utilizarse tan fácilmente. Por una cuestión de marketing, las curvas de los fabricantes suelen ser muy optimistas.

La curva P-V debe delinearse teniendo en cuenta la velocidad del viento tomada a altura del cubo; sin embargo, este procedimiento no siempre es transparente. En algunas ocasiones, se utiliza la velocidad del viento a 10 m. de altura. Esto puede hacer una gran diferencia, especialmente para sistemas muy grandes donde la altura del rotor alcanza hasta 60 m.

Tome conciencia de que la curva P-V fue probablemente hecha a nivel del mar, a una temperatura moderada. La densidad del aire para su aplicación podría ser menor.

Parte relevante de la curva P-V

Para aerogeneradores pequeños, la curva P-V entre 4 m/s y 10-12 m/s es la más importante. Por debajo de 4 m/s, ya no hay energía en el viento porque la velocidad del mismo es muy baja, por lo que no es importante si la turbina arranca, por ejemplo, a 2 m/s.

Por encima de 10-12 m/s no hay energía en el viento porque estas velocidades tan altas casi nunca ocurren.

Para aerogeneradores grandes, la curva P-V hasta 20 m/s puede resultar importante.

Note que el aerogenerador que arranca a una velocidad de viento menor tendrá menos periodos sin producción de energía (pero la salida general podría ser menor).

Salida esperada

Para aerogeneradores pequeños (digamos hasta 10 m. de diámetro) la salida promedio no es mayor a:

$$P = 0.15 .. 0.30\ AV^3 \qquad (8)$$

Si el diámetro es mayor, entonces es difícil dar una cifra. Algunas investigaciones realizadas por autores mostraron un límite superior de $P = 0.5\ A\ V^3$.

6.6.2 Generalidades

Al comprar un aerogenerador, deben tomarse en cuenta los mismos puntos cuando compramos algo costoso.

Confiabilidad: Experiencias

Pregunte a otras personas que han comprado un aerogenerador cuál ha sido su experiencia. ¿Sus máquinas son confiables y funcionan adecuadamente? ¿Con qué frecuencia necesitan mantenimiento? Si se presentó un problema, ¿cuánto tiempo demoró en arreglarlo? ¿El proveedor da garantías? ¿Es posible obtener un contrato de servicios post venta?

De ser posible, visite algunas de los aerogeneradores del tipo que usted está pensando comprar.

Averigüe cuál es la estación de servicio más cercana.

Pregúntele al proveedor cuántos aerogeneradores ha vendido ya. Debería estar en capacidad de brindarle nombres de algunos clientes para referencias.

Ambiente

Los factores más importantes son la velocidad máxima del viento que puede esperarse en el lugar de instalación (¿la velocidad del viento de supervivencia del aerogenerador es lo suficientemente alta?), y el rango de temperatura, la humedad y el contenido de sal de la atmósfera. La arena también podría ser un problema. Todos los soportes y el generador deberán estar, de preferencia, absolutamente cerrados (por ejemplo, de acuerdo al estándar IP55).

Documentación

La documentación también da confiabilidad en el fabricante. ¿Tomó mucho tiempo antes de que el fabricante le dé información? ¿Hay suficiente información relacionada a la máquina? Si la información no es muy clara, generalmente indica que el aerogenerador no es confiable.

Esto se aplica también a los manuales de instalación.

Precio

No hay máquinas muy baratas. Es simplemente imposible fabricar una máquina muy económica que también sea confiable. Busque información de algunas marcas conocidas. El precio de los competidores muy por debajo del promedio debe tomarse con desconfianza.

Acabado del producto

Algunos aspectos aparentemente superficiales pueden ser indicadores de calidad. ¿Los álabes del rotor lucen fuertes? La máquina tiene un buen recubrimiento: pintura, o aún mejor, ¿está galvanizada? ¿El rotor y el cabezal se mueven suavemente?

6.6.3 Resumen

Asumiendo que hay viento suficiente para asegurar una exitosa aplicación de energía eólica, se deben seguir los siguientes 4 pasos:

1. Con respecto a la instalación del aerogenerador, averigüe sobre:

- parámetros estimados de salida
- requerimientos de mantenimiento
- especificaciones climáticas.

2. Trate de verificar la confiabilidad de los diferentes aerogeneradores. Piense en:

   - inspección de las máquinas
   - informes de pruebas
   - converse con algunos propietarios
   - el récord de trayectoria del fabricante
   - contratos de servicios
   - garantías.

3. Elija algunos aerogeneradores (de ser posible, las más confiables) y haga un cálculo exacto de la salida.

   Preste atención a la salida total y la disponibilidad de salida.

4. Haga sus cálculos económicos.

6.7 Seguridad

Seguridad Eléctrica

Como sólo se utilizan 12V ó 24V, no hay peligro alguno de descarga eléctrica. Sin embargo, los cortocircuitos pueden ser peligrosos. En el caso de un cortocircuito habrá mucha corriente en la batería, lo que causará calentamiento y posiblemente la ebullición del líquido. Tome en cuenta que el ácido puede fluir y salir. Un cortocircuito también puede provocar fuego debido al calentamiento de los alambres.

Uno debe tomar en cuenta especialmente los cortocircuitos durante la instalación (y posiblemente el desmantelado de la instalación), pues las conexiones aún no se han fijado y pueden haber cables sueltos.

Para evitar cortocircuitos en el sistema, éste debería contar por lo menos con un fusible. En el caso de que se produzca un cortocircuito, el fusible volará (se derrite) y no puede producirse mayor daño. Nunca reemplace un fusible que ha volado por un pedazo de alambre o un fusible más grande.

Podría necesitarse protección contra relámpagos. Ya que las turbinas están sobre una torre, existe la posibilidad de que se produzca una descarga. Para mayor información sobre seguridad eléctrica consulte otros especialistas.

Seguridad para niños

La instalación debe hacerse definitivamente con extrema seguridad para los niños. Las baterías deben estar siempre almacenadas fuera del alcance de ellos.

El aerogenerador debe ser instalado de tal manera que niños o personas no autorizadas no puedan trepar por la torre. Las personas que trepen por la torre podrían ser golpeadas por el rotor.

Reparaciones

Si deben hacerse reparaciones, el rotor siempre debe frenarse primero. Sólo se debe trepar a las torres con herramientas y aditamentos de seguridad (cuerdas, correas, etc.).

Consulte, por ejemplo, Gipe (ver bibliografía) para mayor información en lo que refiere a materiales para trepar (o algo por el estilo). Gipe también ofrece una lista de solución de problemas: cómo diagnosticar fallas sencillas, por ejemplo.

Cables tirantes

En el caso de las torres sujetas con tirantes, se debe realizar una revisión regular de estos cables. Una pérdida de tensión puede tener resultados desastrosos.

7. INSTALACIÓN DE UN SISTEMA EÓLICO

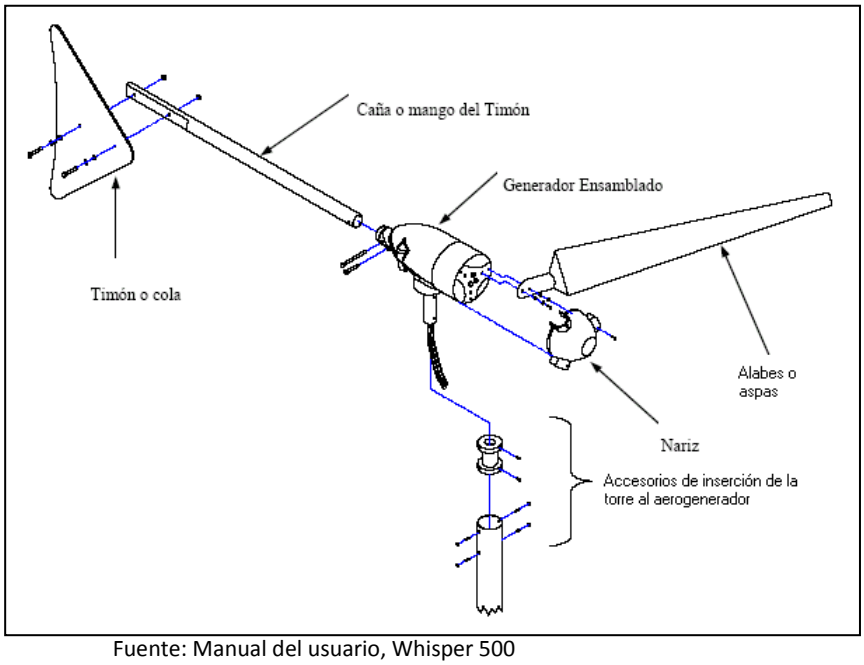
Como ejemplo de instalación, se ha tomado como modelo la instalación de un sistema eólico Whisper de 500W de potencia. Previo a la instalación, se debe verificar lo siguiente:

- Todos los componentes del sistema, el aerogenerador y el inversor deben estar al mismo voltaje del banco de baterías.
- El voltaje de las baterías y la distancia, determinarán el calibre de los cables.
- En el subcapítulo "Guía de solución de problemas y reparaciones" se indica como cambiar el voltaje estándar al voltaje deseado.

7.1 Ensamblaje de la turbina eólica

Cada proveedor posee una técnica para el ensamblaje de su turbina eólica. Sin embargo, muchos pasos se asemejan entre ellos.

Figura 62: Esquema de ensamblaje de una turbina eólica o aerogenerador

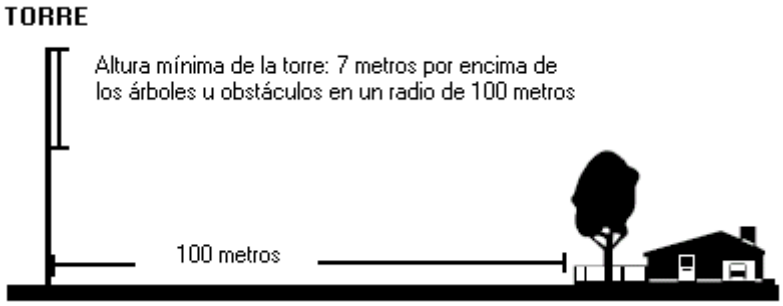


Fuente: Manual del usuario, Whisper 500

7.2 Instalación de la torre

La altura mínima de la torre debe ser de 7 metros por encima de los árboles u obstáculos en un radio de 100 m. La carga de empuje lateral en el extremo de la torre debe corresponder al modelo del aerogenerador (valor dado por el proveedor). El punto más alto del terreno o lugar de instalación, es generalmente el mejor; recuerde que la distancia del aerogenerador al banco de baterías y su voltaje, determinan el calibre adecuado de los cables. Una torre autoportante ocupa menos área de terreno que una torre soportada con cables (riendas, obenques, tirantes), pero es más costosa. Un diseño de torre pivotada permite una instalación sencilla y un mantenimiento fácil en tierra, eliminando la necesidad de escalar.

Figura 63: Consideraciones para instalar la torre



Fuente: Manual del usuario, Whisper 500

7.3 Instalación del Sistema Central de Distribución

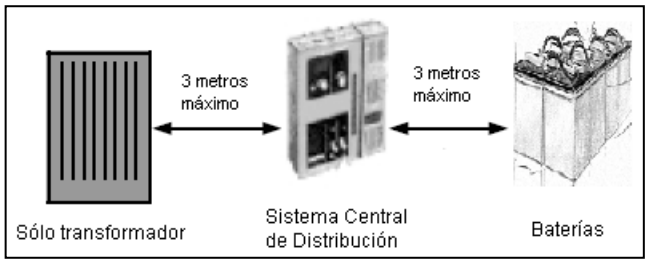
Instale el regulador de carga y el fusible del inversor (sí se usa) al polo positivo de las baterías. En la siguiente figura se detalla esta instalación.

El regulador deberá estar sobre una superficie resistente al calor. Localícelo a 3 m. máximo del banco de baterías. Conecte el regulador CC+ y el CC- a las baterías, usando los cables del calibre correspondiente (CC = corriente continua).

7.4 Instalación de un transformador (opcional, para generadores con alto voltaje: 240 V o más)

Instale el transformador al sistema central de distribución (SCD) sobre una superficie resistente al calor. Localícelos a 3 m. máximo, uno del otro. Conecte el transformador a los terminales WIND (aerogenerador) del regulador, con el cable propuesto por el proveedor. Conecte el regulador CC+ y el CC- a las baterías, usando los cables del calibre correspondiente.

Figura 64: Instalación del SCD y el transformador

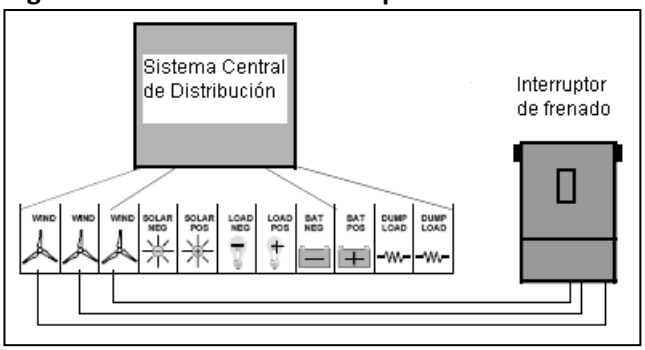


Fuente: Manual del usuario, Whisper 500

7.5 Instalación de un interruptor de frenado (opcional)

Se utiliza instalado al lado del regulador, solamente en aerogeneradores de más de 3000 W de potencia pico (a bajo voltaje: 12, 24, 48 V) o cerca del transformador de un aerogenerador de más de 3000 W de potencia pico (a alto voltaje: 240 V). Se utiliza el cable propuesto por el proveedor, conectando el interruptor a los terminales de WIND (aerogenerador) en el sistema central de distribución (denominado EZ200 en la siguiente figura)

Figura 65: Conexión del interruptor de frenado al SCD

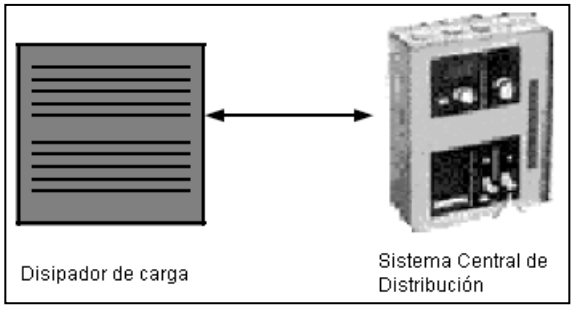


Fuente: Manual del usuario, Whisper 500

7.6 Instalación del disipador de carga

Instale la caja de resistencias (disipadores de carga) sobre una superficie resistente al calor. El disipador de carga produce calor cuando las baterías están cargadas. Este componente se ubica al lado del Sistema Central de Distribución o donde se necesite calor. Vea el Cuadro Nº 10 para calibre de cables para aumentar la distancia entre el disipador de carga y el regulador.

Figura 66: Conexión del disipador de carga al SCD

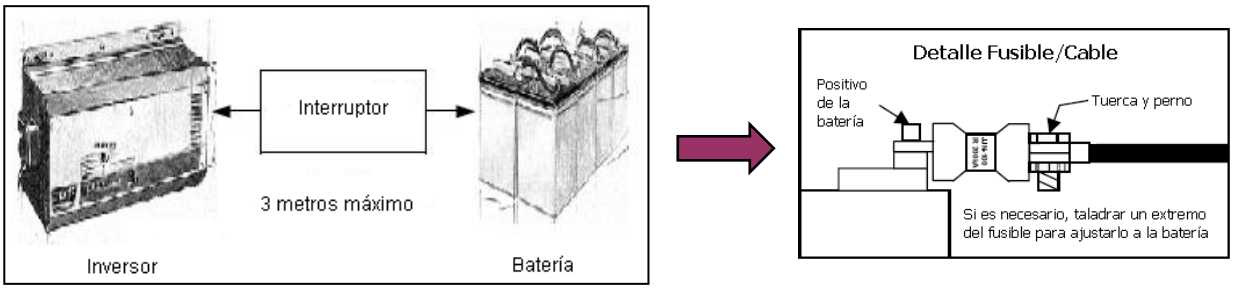


Fuente: Manual del usuario, Whisper 500

7.7 Instalación del inversor

Se debe instalar sobre una pared o estantería. Instale un interruptor entre el inversor y el polo positivo de las baterías. Use los cables que se incluyen en el Cuadro 18 o siga las instrucciones del fabricante del inversor.

Figura 67: Conexión del inversor al SCD



Fuente: Manual del usuario, Whisper 500

7.8 Instalación de las baterías

Adquisición de baterías

Los sistemas de fábrica contienen el banco de baterías sugerido. Vea el ejemplo de una serie de aerogeneradores en el cuadro a continuación, para conocer el tamaño mínimo de baterías.

Cuadro 17: Tamaño mínimo de baterías

Potencia del aerogenerador (W)	450	900	950 – 1000	3000
Voltaje del banco de baterías	12	24	24	48
Mínimo Amperios-hora (estimado para 20 horas)	200 (2 baterías)	200 (4 baterías)	400 (8 baterías)	400 (16 baterías)
Mínimo Kilowatt-hora (Volt x Amp x horas / 1000)	2	4	8	16

Nota: Las baterías deben ser de ciclo profundo (se pueden descargar hasta un 50 - 60%)

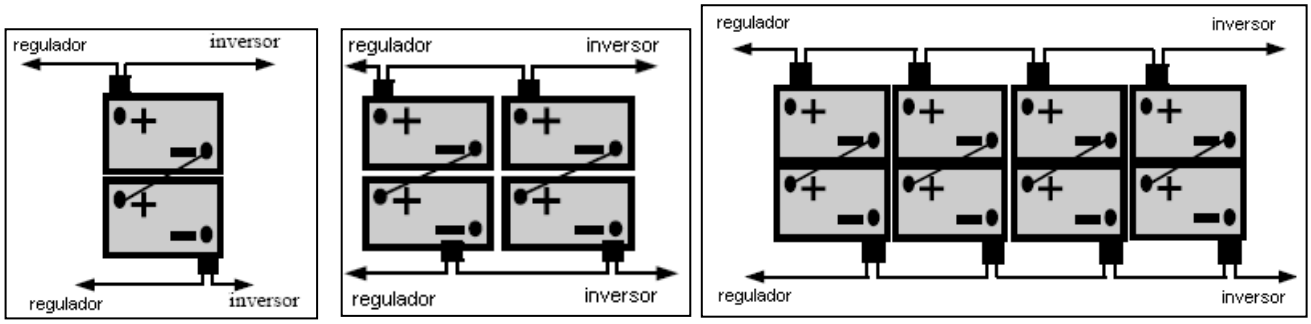
Selección del lugar para instalar las baterías

Ubique las baterías en un lugar fresco, seco y deshabitado. Ponga a funcionar la energía AC desde el inversor hasta la casa o sitio de consumo. Si las baterías están en un lugar habitado, este debe ser cerrado y tener suficiente ventilación. Siga los códigos de seguridad de cada país. Observe los siguientes diagramas para la instalación, según las configuraciones del sistema en serie / paralelo.

Determine la configuración en serie/paralelo y construya un estante, o monte las baterías sobre un mueble resistente, en madera tratada. Deje 5 cm. alrededor para ventilación. Deje 60 cm. de separación vertical para el acceso a los terminales y revisión del agua destilada.

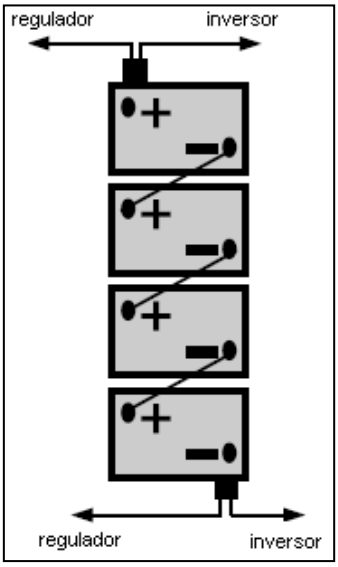
Figura 68: Configuraciones serie / paralelo según voltaje del sistema

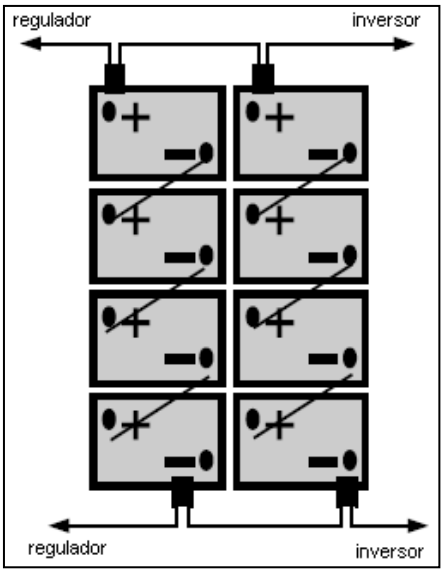
Configuraciones para 12 Voltios

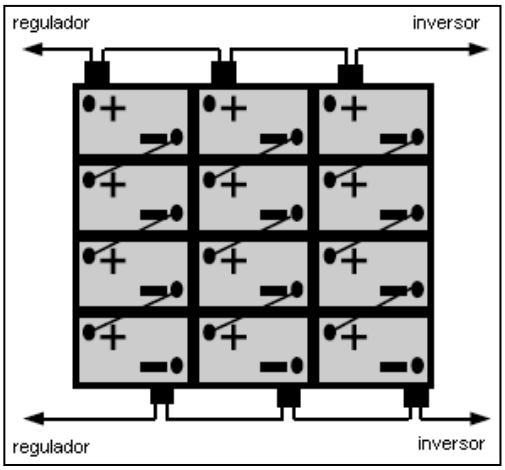


Fuente: Manual del usuario, Whisper 500

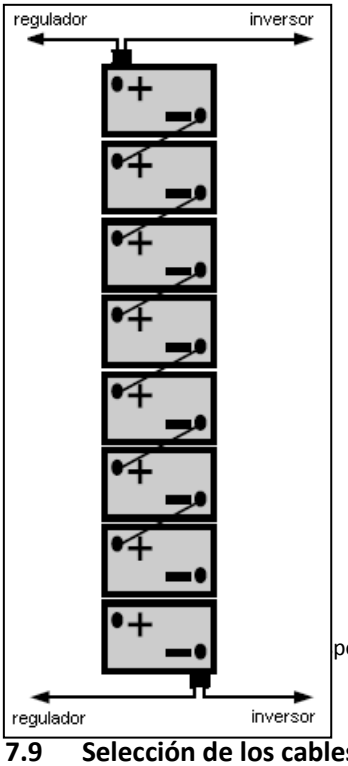
Configuraciones para 24 Voltios

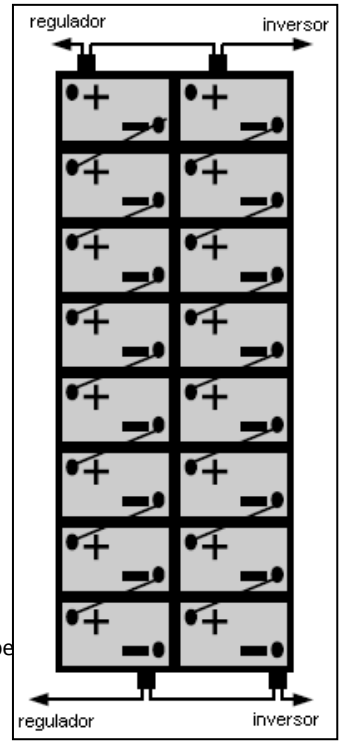


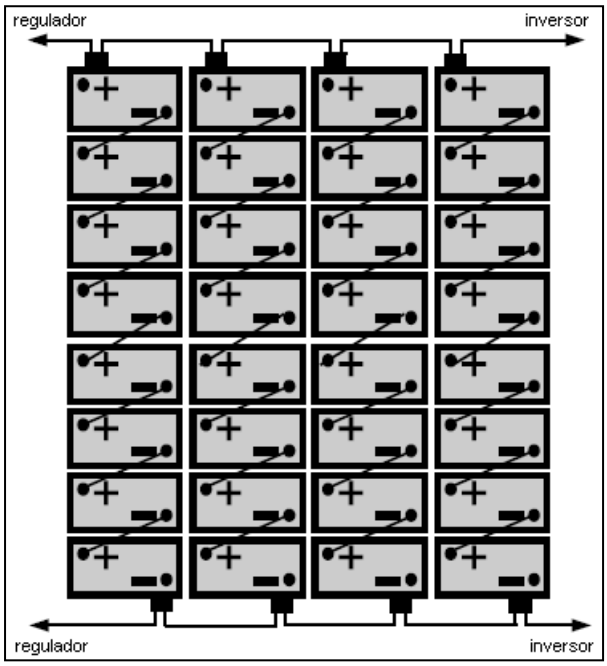




Configuraciones para 48 Voltios







pe

7.9 Selección de los cables

Siga el cuadro de tamaño de los cables CC (Cuadro 18) o las instrucciones del proveedor para el cableado de las baterías al inversor. Proteja todas las conexiones con grasa o protector de corrosión, disponibles en cualquier ferretería o tienda de repuestos automotrices.

Los siguientes cuadros se usan para determinar el calibre de cable requerido, según la distancia, (en una dirección) para conectar los componentes CC.

Cuadro 18: Máxima distancia en metros para cables de cobre de diferente calibre

Voltaje de batería	12	12	12	12	24-36	24-36	24-36	48-72	48-72	120	120	240	240
Amperios	400	200	100	50	200	100	50	100	50	50	25	25	10
Tamaño del cable AWG	**EN METROS**												
10	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	90	180	450
8	-	-	-	6	-	-	11	-	22	60	120	230	600
6	-	-	3.5	7	-	7	14	14	30	75	150	290	750
4	-	-	4.5	9	-	9	18	18	36	90	180	360	900
3	-	-	6	11	-	11	22	22	45	120	230	450	1200
2	-	3.5	7	14	7	14	30	30	60	150	290	600	1500
1	-	4.5	9	18	9	18	36	36	75	180	360	750	1800
0	-	6	11	22	11	22	45	45	90	230	450	900	2300
2/0	-	7	14	30	14	30	60	60	120	290	600	1200	3000
3/0	-	9	18	36	18	36	75	75	150	360	750	1500	3600
4/0	6	11	22	45	22	45	90	90	180	450	900	2000	4500

Fuente: American Wire Gauge (AWG)

Cuadro 19: Conversión de calibre AWG a calibre métrico

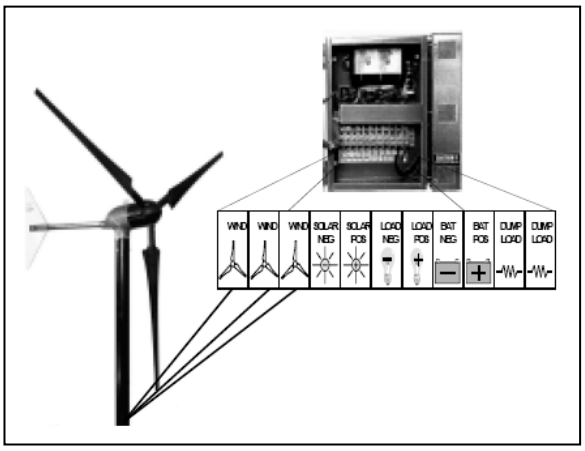
Calibre AWG	14	12	10	8	6	4	3	2	1	0	2/0	3/0	4/0
Diám. pulg.	0.0641	0.081	0.102	0.129	0.162	0.204	0.229	0.258	0.289	0.325	0.365	0.41	0.46
Diám. m^2	1.628	2.057	2.591	3.277	4.115	5.182	5.817	6.553	7.341	8.255	9.271	10.41	11.68

Fuente: Elaboración propia

Instalación de los cables desde el extremo de la torre al regulador (o al transformador, cuando se trata de aerogeneradores de alto voltaje)

Use tres cables. Si se trata de aerogeneradores de alto voltaje (240V), adicione una puesta a tierra desde la torre hasta el lugar de instalación. Use los cables de acuerdo con el cuadro de calibres, según el modelo de su aerogenerador.

Figura 69: Cableado torre – regulador o torre – transformador



8. OPERACIÓN Y MANTENIMIENTO DE UN SISTEMA EÓLICO

8.1 Pruebas eléctricas

Para el generador

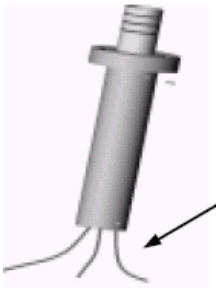
Realice estas pruebas antes de montar los álabes en el rotor. Estas pruebas confirman que el aerogenerador esta funcionando correctamente y listo para ser instalado en la torre.

CIRUITO CERRADO

Cuando los cables están en corto el generador debe ofrecer resistencia, y girar suavemente.

TIERRA

Revise la resistencia a tierra con cualquier cable. La resistencia debe exceder 10,000 ohmios.

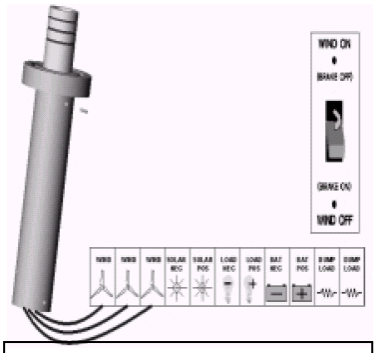


CIRUITO ABIERTO

Cuando los cables están en circuito abierto, el generador debe girar libremente.

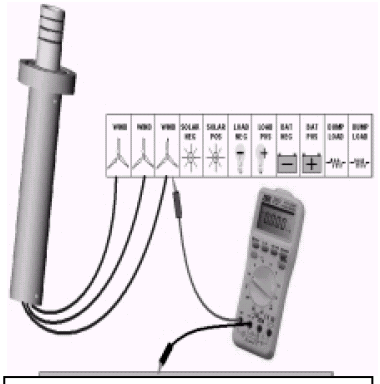
Prueba del cableado del aerogenerador al Sistema Central de Distribución (SCD)

(No instale las aspas hasta haber pasado las pruebas) Repita el paso 12 activando el interruptor de frenado (Brake Switch en posición ON) para poner los cables en corto.



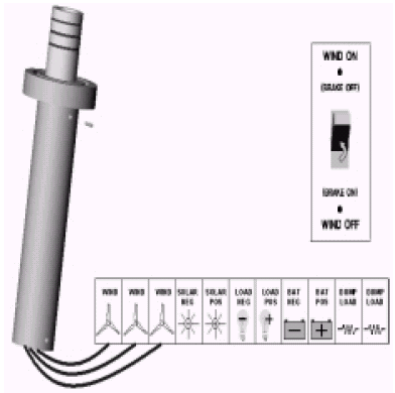
CORTOCIRCUITO

Con los cables del aerogenerador conectados al SCD y con el interruptor de frenado en posición ON, el rotor debe girar con alta resistencia, pero uniformemente



TIERRA

Por ejemplo: tubo de acero galvanizado.
Revise la resistencia a tierra usando cualquier cable. La resistencia debe exceder 10,000 ohmios.



CIRCUITO ABIERTO

Cuando los cables del aerogenerador estén conectados al SCD y el interruptor de frenado desactivado (Brake Switch en posición OFF), el generador debe girar libremente. La resistencia debe exceder 10,000 ohmios.

8.2 Mantenimiento de un sistema eólico

Se debe realizar un **mantenimiento preventivo mensual**, de acuerdo a los siguientes pasos:

8.2.1 Revisión del interruptor de seguridad

DETENGA EL AEROGENERADOR EN UN VIENTO MODERADO (CARGANDO PERO NO PLEGADO). Cuando se detenga la hélice, no se debe observar ni detectar ninguna dificultad inusual o ruido extraño. Cuando se presenta algún ruido mientras se activa el interruptor de frenado, esto puede indicar un cable desconectado.

8.2.2 Revisión del estado mecánico

OBSERVE Y ESCUCHE DESDE LA BASE DE LA TORRE. Use binoculares. No debe presentarse ningún ruido mecánico, cascabeleo o vibración. La hélice y la cola no deben cabecear o tambalearse. Si se requiere, escale o baje la torre para su inspección. No debe presentarse ningún zumbido ni al oído ni al tacto cuando coloque su mano sobre la torre. Revise el subcapítulo “Problemas Eléctricos”.

8.2.3 Inspección de la torre

Siga todos los requisitos de inspección y mantenimiento que da el fabricante de la torre. Ajuste adecuadamente todas las tuercas y pernos, especialmente las conexiones de los cables. Revise cualquier fisura, pandeado o partes rotas en los anclajes y base de la estructura. Revise que no haya hilos rotos o distensión en los cables de soporte o tensión.

Se debe realizar un **mantenimiento preventivo anual**, de acuerdo a los siguientes pasos:

8.2.4 Revisión de las baterías

Agregue agua destilada si está en un nivel bajo. Ajuste las conexiones de los bornes de las baterías. Remueva la corrosión y proteja los terminales. Enjuague las partes con solución de soda cáustica.

Si es necesario, realice la carga de igualación de la batería

No es necesario realizar una carga de igualación si el voltaje de flotación de cada celda está en 2.4 voltios o más. Si las baterías se descargan por largos períodos o las lecturas higrométricas de las celdas difieren por más de 20 puntos (ej. 1205 vs. 1230) o una celda está débil, dé a la batería una carga de igualación.

Iguale el voltaje de las celdas de las baterías colocando el botón selector de flotación en 2.7-2.8 y permita que la batería llegue a plena carga y gasifique libremente (reduzca la carga y/o conecte un generador si es necesario). Deje cargar las baterías por lo menos durante 24 horas y tome lecturas con el higrómetro. La igualación se ha completado cuando las lecturas del hidrómetro tengan 20 puntos, máximo, de rango. Revise el nivel del agua y si es preciso, disminuya la carga para evitar que la batería este demasiado caliente al tacto.

8.2.5 Revisión mecánica total del aerogenerador

Escale a la torre o bájela y haga una revisión mecánica total del aerogenerador. Ajuste cualquier pieza que se encuentre floja o cambie las piezas desgastadas.

a) Ajuste todas las tuercas y pernos de montaje de la torre y los pernos de montaje del rotor.

b) Revise todos los rodamientos. Se acepta un juego escasamente perceptible.
c) Rellene las fisuras de las hélices (si son de fibra de vidrio) con sellante de silicona. Reemplácelas si hay alguna rota o dañada. Repare o reemplace los álabes si están quebrados o dañados.

Registro de mantenimiento

Para llevar un registro de los requisitos mensuales y anuales de inspección, es necesario llevar un Libro de Mantenimiento y Ocurrencias. A continuación se da un ejemplo de cómo podría hacerlo.

Cuadro 20: Ejemplo de Libro de Mantenimiento y Ocurrencias

FECHA	PROBLEMA / OBSERVACIÓN	ACCIÓN TOMADA

8.3 Guía de solución de problemas y reparaciones (Troubleshooting)

8.3.1 Del aerogenerador

Refiérase a los siguientes tres cuadros de guía de solución de problemas y determine si el problema es mecánico o eléctrico. Si es mecánico, siga el cuadro Síntomas de Problemas Mecánicos.

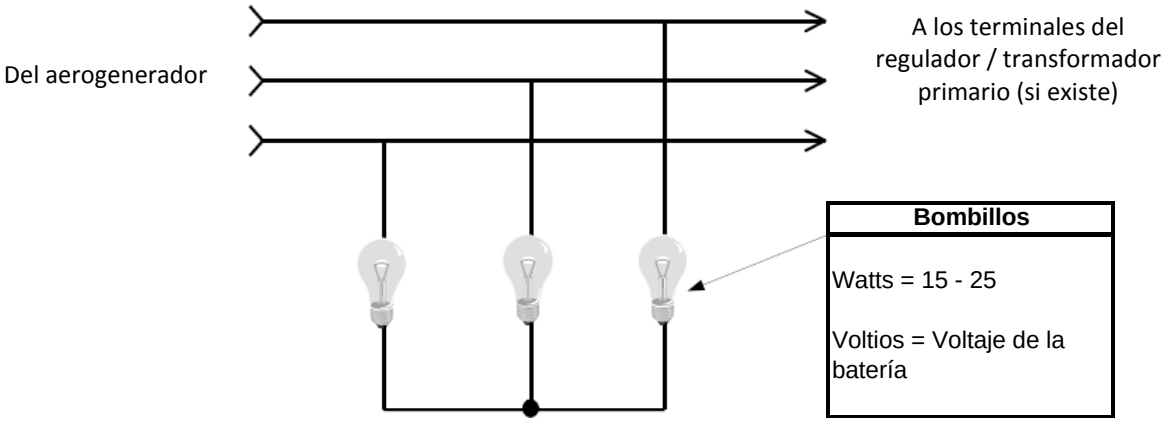
Los problemas eléctricos pueden estar en el aerogenerador o en el regulador. Determínelo, de la siguiente manera:

a) Si el aerogenerador no gira normalmente (los álabes giran lentamente como si el freno estuviera activado): En un día de viento moderado, desconecte todos los cables del aerogenerador en el regulador, uno a la vez. Si el aerogenerador gira, el cable que permite su movimiento llega a un diodo dañado del regulador. Reemplace el diodo.

b) Si el aerogenerador no gira, entonces desconecte dos cables, en un día de viento moderado. Si el aerogenerador todavía no desarrolla velocidad, el problema está en el cableado de la torre, en el aerogenerador. Vaya al cuadro Síntomas de Problemas Eléctricos.

c) Si el aerogenerador está girando, pero puede tener un problema eléctrico, la “Instalación de Prueba” que se muestra a continuación puede ser de ayuda.

Figura 70: Instalación de prueba


Del aerogenerador
A los terminales del regulador / transformador primario (si existe)
Bombillos
Watts = 15 - 25
Voltios = Voltaje de la batería

Instalación de prueba

1. Los bombillos se iluminan uniformemente y su luz se intensifica u opaca con el viento = Todo está bien.
2. Un bombillo con baja intensidad significa que un cable del aerogenerador no transmite energía. Revise en orden: Cableado de la torre, anillo colector y escobillas, conexiones del estator y bobinado del estator.
3. Un bombillo más brillante significa un diodo abierto en el mismo cable. Siga el diodo del cable y cámbielo.
4. Si un bombillo permanece iluminado cuando el interruptor que da al aerogenerador está apagado (Posición OFF) significa que: a) hay una falla en el interruptor de frenado, b) este cable no está conectado a los otros dos.
5. Si uno de los bombillos tiene poca intensidad: a) hay una mala conexión de voltaje en el aerogenerador, o b) hay fallas en el bobinado del estator.

Cuadro 21: Detección de problemas mecánicos

SÍNTOMA	CAUSA POSIBLE	CORRECCIÓN
1. Álabes estacionarios incluso con vientos fuertes	a) Hielo en el generador o carga de hielo desigual en los álabes b) Residuos entre el rotor y el estator c) Magneto suelto o sobresaliente d) Rodamiento dañado	a) Espere clima mas caliente b) Gire suavemente la hélice con la mano; sople y use una hoja de papel para retirar los residuos c) Remueva el rotor y vuelva a pegar el magneto d) Reemplace el rodamiento
2. Los álabes no giran, excepto con altos vientos, sonido de roce a bajas revoluciones, siempre se detiene en la misma posición	a) Igual al anterior; probable-mente haya un magneto sobresaliente o un rodamiento dañado b) Los protectores de cable se han engrosado debido a la alta humedad	a) Igual al anterior b) Contacte la fábrica. El estator necesita repintado diélectrico
3. Los álabes giran con dificultad, la generación de energía es baja y hay mayor ruido en el rotor de lo normal	a) Hielo en el álabe b) Álabe sucio c) Borde de ataque erosionado o cinta guía dañada d) Álabe roto, dañado o deformado	a) El álabe eventualmente botará el hielo, déjelo girar a no ser que haya una vibración excesiva b) Limpie con jabón y con un limpiador de extensión c) Arregle el álabe y reemplace la cinta d) Repare o reemplace el álabe
4. Los álabes dan vueltas pero no desarrollan velocidad	a) Álabes en posición contraria (véase instalación de los álabes)	a) Cambie el sentido de los álabes. El borde de ataque gira en el sentido de las manecillas del reloj, visto en posición frontal (up-wind)
5. El timón, el aerogenerador y la torre vibran a cualquier velocidad del viento	a) Álabe desbalanceado b) Álabe desalineado c) Rotor (carcasa con los magnetos) desbalanceado	a) Balancee o reemplace el álabe b) Reemplace la platina (u otro sistema de sujeción) que sujeta los álabes. Use arandelas en los tornillos para nivelar la platina. Reemplace los álabes. c) Envíelo a la fábrica o a un taller de balanceo
6. Cascabeleo del generador	a) Generador suelto en la torre b) Rotor suelto (carcasa con magnetos) sobre el eje; Timón suelto; Tope amortiguador de caucho faltante; Cables internos sueltos y pegando al mástil; Tornillo del pivote del gobernador suelto c) Rodamientos gastados d) Eje roto	a) Apriete la estructura y use un aditivo o similar para mantener apretada la estructura (lock tight) b) Repare según necesidad c) Reemplace los rodamientos d) Reemplace el eje

Cuadro 22: Detección de problemas eléctricos

SÍNTOMA	CAUSA POSIBLE	CORRECCIÓN
1. La hélice gira lentamente incluso en vientos fuertes, pero no desarrolla velocidad	a) Interruptor WIND (Viento) en posición OFF (freno activado) b) La batería está muerta (voltaje menor que la mitad del nominal) c) Cableado incorrecto del generador d) Corto circuito en el cableado del generador hacia el regulador e) Corto en los diodos en el regulador f) Corto circuito en la tarjeta de la escobilla o en el ensamblaje del anillo de contacto o colector g) Corto en el generador	a) Coloque el interruptor WIND en posición ON b) Desconecte la carga y/o batería del regulador hasta que el generador arranque c) Conecte los cables nuevamente para que concuerde con el voltaje de las baterías d) Véase procedimiento de instalación 8.1 Prueba del cableado e) Vea el numeral 8.3.1 Del aerogenerador f) Vea “Escobillas y soporte de las escobillas” en el manual del modelo tomado como ejemplo g) Rebobine el generador
2. Los álabes se mueven muy rápido, pueden silbar, no hay carga, no hay ruido mecánico inusual	a) Carga desconectada b) Dos o tres cables está desconectados entre el generador y el regulador c) Diodos del regulador abiertos o cable desconectado en el terminal del diodo	a) Revise el fusible de las baterías y todas las conexiones b) Vea el numeral 8.3 c) Vea 8.1 Prueba del cableado
3. Los álabes se mueven muy rápido, pueden silbar, no hay carga, no hay ruido mecánico inusual	a) Voltaje de la batería por encima del 50 % b) Conexión incorrecta de la generador	a) Batería muy pequeña Batería sin agua Cableado de la batería malo o defectuoso Batería gastada b) Conecte los cables nuevamente
4. Los álabes se mueven muy rápido, pueden silbar, potencia menor al 50 % para la velocidad del viento, **gruñido**, zumbido, se siente vibración a través de la mano en el mástil	a) Cable desconectado entre el generador y el regulador b) Un diodo abierto o desconectado c) Un anillo de contacto o escobilla puede no estar haciendo buena conexión d) Conexión incorrecta del generador	a) Vea numeral 8.3 b) Vea numeral 8.3 c) Vea “Escobillas y soporte de las escobillas” en el manual del modelo tomado como ejemplo d) Vea “Conexiones eléctricas del aerogenerador” en el manual del modelo tomado como ejemplo
5. Los álabes se mueven muy lentamente, carga baja, no hay ruido mecánico inusual	a) Bajo voltaje de la batería o batería muerta b) Conexión equivocada del voltaje del generador	a) Desconecte la carga y deje que la batería cargue b) Vea “Conexiones eléctricas del aerogenerador” en el manual del modelo tomado como ejemplo

Cuadro 23: Detección de problemas del regulador

SÍNTOMA	CAUSA POSIBLE	CORRECCIÓN
1. Los álabes giran lentamente, incluso en vientos fuertes	a) Interruptor WIND (Viento) en posición OFF (freno activado) b) Diodo en corto c) Batería muerta d) Corto en conexión al generador	a) Coloque el interruptor WIND en posición ON b) Reemplace el diodo. Un diodo en corto conectado al terminal WIND detiene el generador cuando se conecta. Vea numeral 8.3 c) Cargue o remueva la carga d) Vea “Síntomas de Problemas Eléctricos”
2. Pantalla de Lectura en negro	a) Batería muerta o desconectada b) Fusible de la tarjeta de control quemado c) Voltaje incorrecto de las baterías d) Pantalla de lectura dañada	a) Cargue o remueva los consumos b) Reemplace el fusible, seque la tarjeta Si se quema nuevamente véase “Circuito del regulador” para posibles problemas de operación c) Vea “Para cambiar el voltaje de las baterías del sistema” en el manual del modelo tomado como ejemplo d) Reemplácela
3. Lecturas erráticas en la Pantalla	a) Interruptor del selector de medidas b) Tarjeta de circuitos húmeda o mojada c) Tarjeta de circuitos dañada d) Pantalla de lectura dañada	a) Use un limpiador de contactos, gire el interruptor a través de todas las posiciones una docena de veces Reemplace el interruptor b) Deje secar Rocíe con impermeabilizador eléctrico c) Reemplace o mande repararla Vea “Posibles Problemas del Regulador” d) Reemplácela
4. Pantalla de Lectura imprecisa	a) Necesita ajuste b) Tarjeta de circuitos dañada	a) Vea “Procedimiento de calibración” en el manual del modelo tomado como ejemplo b) Reemplace tarjeta de circuitos
5. No hay regulación, luz roja apagada y disipador de resistencias frío	a) Voltaje de la batería por debajo de la posición seleccionada b) Necesita ajuste c) Tarjeta de circuitos dañada	a) Ajuste el parámetro seleccionado. Revise el voltaje de la batería. Vea “Operación normal/regulador automático de carga” en el manual del modelo tomado como ejemplo b) Vea “Procedimiento de calibración” en el manual del modelo tomado como ejemplo Revise el puente (jumper) del selector de voltaje c) Vea “Procedimiento de calibración” en el manual del modelo tomado como ejemplo
6. No hay regulación, luz roja encendida y disipador frío	a) Disipador quemado o desconectado o conexión equivocada b) Mala conexión de la tarjeta de circuito al FET	a) Abra la caja y revise elementos del disipador b) La medición del voltaje entre el cable pequeño de la conexión al FET

	c) Interruptor FET quemado	y la batería debe estar entre 8 y 11 V CC c) Reemplace o repare
7. Disipador siempre prendido, luz roja prendida	a) Parámetro seleccionado del regulador de carga equivocado b) Necesita ajuste c) Tarjeta de circuitos dañada	a) Vea en el Manual Técnico del proveedor: **Cómo cambiar el voltaje de las baterías del sistema** b) Vea en el Manual Técnico del proveedor: **Procedimiento de calibración** c) Vea en el Manual Técnico del proveedor: **Circuito del regulador**
8. Disipador siempre prendido, luz roja apagada	a) Interruptor FET en corto b) Interruptor FET conectado a tierra	a) Reemplácelo o repárelo b) Afloje los tornillos de montaje del interruptor y observe si hay cortos o zumbidos

ANEXOS

ANEXO 1

ESCALA DE BEAUFORT

N°	VELOCIDAD			DESCRIPCIÓN	PRESIÓN MÁXIMA (TEÓRICA) SOBRE SUPERFICIE FRONTAL [N/M^2]
0	0-1	0-1	0-2	Calma	1
1	1-3	1-2	2-6	Brisa muy ligera	3
2	4-6	2-3	7-11	Brisa ligera	12
3	7-10	4-5	13-19	Pequeña brisa	33
4	11-16	6-8	20-30	Linda brisa	85
5	17-21	9-11	31-39	Buena brisa	146
6	22-27	11-14	41-50	Viento fresco	241
7	28-33	14-17	52-61	Gran fresco	360
8	34-40	17-21	63-74	Golpe de viento	529
9	41-47	21-24	76-87	Fuerte golpe de viento	731
10	48-55	25-28	89-102	Tempestad	1001
11	56-63	29-32	104-117	Tempestad violenta	1313
12	64-71	33-37	119-131	Huracán	1668
13	72-80	37-41	133-148	—	2117
14	81-89	42-46	150-165	—	2620
15	90-99	46-51	167-183	—	3242
16	100-108	51-56	185-200	—	3859
17	109-118	56-61	202-219	Ciclón	4606

ANEXO 2

DENSIDAD DEL AIRE

La densidad del aire está dada por:

$$\rho = 3.4839 \times 10^{-3} \; P/T \qquad (2.1)$$

Donde:

P presión [Pa] = [N/m^2]
presión atmosférica normal a nivel del mar = 101325 Pa
T temperatura [K]
ρ densidad del aire [kg/m^3]

Si usamos unidades más comunes esto se transforma en:

$$\rho = 348.39 \frac{p}{t + 273.16} \qquad (2.2)$$

Donde:

p = presión [bar]
presión atmosférica normal a nivel del mar = 1.01333 bar
t = temperatura [°C]

Conversión para otras unidades de presión
1 atm (atmósfera) = 101,325 Pa = 1.01325 bar
1 cm Hg (centímetro de mercurio) = 1,333.2 Pa = 0.01333 bar
1 mbar (milibar) = 100 Pa = 0.001 bar
1 bar = 100,000 Pa

Cuadro 2.1: Influencia de la temperatura en la densidad del aire (a nivel del mar, presión 1013 mbar)

TEMPERATURA [GRADOS C]	DENSIDAD DEL AIRE [KG/M^3]	CONTENIDO DE ENERGÍA (E=100 A 15 C] [%]
-20	1.394	114
-10	1.341	109
0	1.292	105
10	1.247	102
15	1.225	100
20	1.204	98
30	1.164	95
40	1.127	92

La densidad del aire varía de acuerdo a la altura. A mayor altura, menor será la presión. Este efecto negativo en la densidad del aire es compensado parcialmente por una temperatura más baja. Vea el Cuadro 2.2.

Cuadro 2.2: Influencia de la altitud en la densidad del aire (presión y temperatura calculadas en condiciones atmosféricas estándar)

Altitud	Temperatura Promedio [°C]	Presión Promedio [mbar]	Densidad del aire [kg/m^3]	Contenido de energía [%]
0 (nivel del mar)	15	1013	1.225	100
1000	8.5	899	1.112	91
2000	2	795	1.006	82
3000	-4,5	701	0.909	74
4000	-11	616	0.819	67

ANEXO 3

LEGISLACIÓN Y NORMATIVA Y RENOVABLE

Desde los primeros proyectos de energía solar desarrollados a inicios de los años 80, la energía renovable ha evolucionado positivamente y hoy en día existe legislación y normativa, que permite la inversión privada y apoya los esfuerzos que están haciendo profesionales, empresas, universidades y ONGs por desarrollar este mercado.

Aunque la mayor cantidad de normas son de energía solar fotovoltaica y térmica, existen las siguientes normas que se refieren a la energía eólica también:

Energías renovables interconectadas a la red (grandes sistemas, inclusive los eólicos)

- ⇒ Ley Nº 1002, Promoción de la inversión para la generación de electricidad con el uso de energías renovables.
- ⇒ D. S. Nº 050-2008-MEM, Reglamento de la generación de electricidad con energías renovables.

Aún no existen Normas Técnicas Peruanas (NTP) para la energía eólica.